



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE QUÍMICA

**USO EFICIENTE DE ENERGÍA, DESARROLLO
SUSTENTABLE Y CONSERVACIÓN DE RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES. EL CASO DE LAS BOLSAS
DE POLIETILENO VERSUS LA UTILIZACIÓN DE OTROS
MATERIALES**

T E S I S

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA QUÍMICA (PROCESOS) - INGENIERÍA DE PROCESOS

P R E S E N T A:

BÁRBARA MARGARITA RAMÍREZ RAYLE

TUTOR:

Dr. CARLOS E. ESCOBAR-TOLEDO

2010





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. DURÁN DOMÍNGUEZ MARÍA DEL CARMEN

Secretario: Dr. BARRAGÁN AROCHE FERNANDO

Vocal: M.C. URESTI MALDONADO MARCO ANTONIO

1^{er}. Suplente: Dr. VALDIVIESO MARTÍNEZ RAÚL

2^{do}. Suplente: Dr. ESCOBAR TOLEDO CARLOS ENRIQUE

Lugar en donde se realizó la tesis:

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA**

TUTOR DE TESIS:

Dr. CARLOS E. ESCOBAR TOLEDO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco muy cumplidamente al **CONACyT**, por haberme otorgado una beca para realizar mis estudios de maestría y apoyar así la investigación.

Agradezco también a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico que a través de los Proyectos de Apoyo para la Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) me concedió una beca para realizar la presente tesis a través del proyecto **PAPIIT No. IN102710** “Uso eficiente de energía, desarrollo sustentable y conservación de recursos no renovables: sustitución de bolsas individuales de polietileno y botellas personales de PET por otros materiales usados como empaques individuales y envases personales”. El haber colaborado en este proyecto enriqueció mi formación académica y personal, independientemente del apoyo financiero que recibí.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a la **Facultad de Química**, por haberme abierto sus puertas y haberme brindado la oportunidad sobre todo de aprender.

Agradezco a mis sinodales: la Dra. María del Carmen Durán Domínguez, el Dr. Fernando Barragán Aroche, el M.C. Marco Antonio Uresti Maldonado, el Dr. Raúl Valdivieso Martínez y el Dr. Carlos Enrique Escobar Toledo por sus valiosos comentarios y aportaciones que hicieron de este un mejor trabajo de investigación.

DEDICATORIAS

A mi familia por haberme apoyado en todo momento. A mi padre por enseñarme a hacer las cosas de la manera correcta y ser siempre un ejemplo de sabiduría. A mi madre por su dedicación, amor, confianza y transparencia. A mi hermano César por su gran corazón, a Berenice y a Aura por su compañía y espíritu.

A Santiago por hacer de mí una mejor persona con su sonrisa que nunca falla, te quiero mucho linda personita.

A la familia Juárez Tagle por brindarme su confianza y apoyo en todo momento.

A mis amigos y compañeros de la maestría por haber pasado esta etapa en su compañía, en especial a Iván quien siempre ha estado ahí desde los primeros días, gracias amigo.

A mis niñas Emmita y Pau, por su cariño de siempre y para siempre, las quiere mamá Barbie.

A Laura, quien me ha brindado su amistad por muchos años, mi amiga número uno.

A mi asesor de tesis, el Dr. Carlos Escobar por su compañerismo, conocimientos y buena voluntad sin los cuales este trabajo no hubiera sido posible.

A todos aquellos que estuvieron conmigo en este proceso, gracias.

Y con gran amor dedico este trabajo a Leonardo (LRJT), por ser mi persona especial, gracias pumita por ponerle sonrisas a mi corazón, por tu inigualable compañía y apoyo, por ser una inspiración en mi vida y compartir quien eres conmigo:

“Here, making each day of the year.
Changing my life with a wave of his hand.
Nobody can deny that there's something there”...

CONTENIDO

Resumen	10
Abstract	11
Nomenclatura	12
Objetivos	16
Alcances	17
Hipótesis	18
Introducción	19

Capítulo I. Marco de referencia: desarrollo sostenible y su relación con la energía y el análisis de ciclo de vida **23**

1.1	Introducción	24
1.2	Definición de desarrollo sostenible	24
1.3	Condiciones para un desarrollo sostenible	25
1.4	Cronología	29
1.5	México ante el desarrollo sostenible	29
1.5.1	Órganos e Instituciones	32
1.5.2	Leyes	32
1.5.3	La UNAM y el desarrollo sostenible	33
1.6	Mecanismos de Kioto	33
1.6.1	Los bonos de carbono	35
1.6.1.1	México y los bonos de carbono	36
1.7	La energía dentro del marco del desarrollo sostenible	36
1.8	La industria petroquímica en el papel del desarrollo sostenible	42
1.9	Residuos sólidos	43
1.9.1	Opciones para el manejo de los residuos sólidos urbanos	47
1.10	Análisis de ciclo de vida y desarrollo sostenible	48

Capítulo II. Análisis de exergía: conceptos y método de análisis **50**

2.1	Introducción	51
2.2	Estado del arte del concepto de exergía	51
2.3	Primera y segunda leyes de la Termodinámica	55
2.4	Definición de exergía	57
2.5	Disponibilidad termodinámica	59
2.6	Tipos de exergía	59
2.6.1	Exergía física	61
2.6.2	Exergía química	61
2.7	Comparación entre energía y exergía	62
2.8	Pérdidas de exergía	62

2.8.1 Irreversibilidad	63
2.9 Método de análisis de exergía	64
2.10 Eficiencia	65
2.10.1 Eficiencia simple	65
2.11 Aplicaciones del análisis de exergía	66
2.12 La exergía y su relación con el desarrollo sostenible	66
Capítulo III. Análisis de ciclo de vida y su adición con el análisis de exergía	68
3.1 Introducción	69
3.2 Metodología del análisis de ciclo de vida	70
3.3 Análisis de ciclo de vida exergético	74
Capítulo IV. Metodología general de análisis	78
4.1 Esquema general	79
4.2 Método de análisis de exergía	83
4.2.1 Aplicación del análisis de exergía a un proceso	83
4.2.2 Cálculo de la exergía química de las sustancias involucradas	84
4.2.3 Desarrollo de los cálculos de acuerdo con la metodología	86
4.3 Métodos multicriterio	86
4.3.1 Forma de estructurar una jerarquía	90
4.3.2 Metodología PROMÉTHÉE	91
4.3.2.1 Clasificación I y II de PROMÉTHÉE	95
Capítulo V. Estudio de caso	99
5.1 Introducción	100
5.2 Definición del problema	101
5.3 Definición del objetivo y del alcance	103
5.4 Materiales	103
5.5 Origen de los datos	104
5.6 Consideraciones	105
5.7 Resultados	105
Conclusiones	120

Apéndices

Apéndice 1. Procesos de producción	128
Apéndice 2. Memoria de cálculo	159

Bibliografía	182
---------------------	------------

Índice de Figuras

Figura 1.1. Elementos principales para el desarrollo sostenible	27
Figura 1.2. Relación entre las actividades humanas y los recursos naturales	28
Figura 1.3. Principales países vendedores de bonos de carbono	37
Figura 1.4. Demanda de energía primaria para el periodo 2007-2030 en millones de toneladas de energético equivalente al petróleo (MMtpe)	39
Figura 1.5. Producción de energía primaria en México	40
Figura 1.6. Abatimiento de emisiones de CO ₂	41
Figura 1.7. Generación de residuos sólidos urbanos por entidad federativa per cápita en el 2005	46
Figura 2.1. Número de publicaciones por país	54
Figura 2.2. Intensidad de publicaciones respecto al tiempo	55
Figura 2.3. Exergía sustancial	60
Figura 2.4. Ilustración cualitativa de la relación entre el impacto ambiental, la sostenibilidad de un proceso y su eficiencia exergética	67
Figura 3.1. Ejemplo de un sistema de producto para un análisis de ciclo de vida	72
Figura 3.2. Diagrama de exergía para el ciclo de vida de 3000 vasos de poliestireno	77
Figura 3.3. Diagrama de exergía para el ciclo de vida de una taza de porcelana	77
Figura 4.1. Marco de referencia	80
Figura 4.2. Metodología propuesta para evaluar materiales con la misma función	81
Figura 4.3. Entradas y salidas de un bloque	83
Figura 4.4. Relaciones de dominancia donde g_j, g_k, g_s, g_r son las evaluaciones de los criterios j, k, s y r , a y b representan opciones a evaluar y P, I y R indican preferencia, indiferencia e incomparabilidad, respectivamente	89
Figura 4.5. Jerarquía de tres niveles	90
Figura 4.6. Función de preferencia donde $d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b)$ y $P_j(a,b)$ representa la función de preferencia entre los criterios a y b	92
Figura 4.7. Gráfico de índices de preferencias agregadas donde a, b, c y d son opciones, $\pi(a,b)$ indica la preferencia de a sobre b y $\pi(b,a)$ indica la preferencia de b sobre a	96
Figura 4.8. Flujos de categorías de PROMÉTHÉE donde a es una opción, $\phi^+(a)$ es el flujo de categoría dominante y $\phi^-(a)$ es el flujo de categoría inferior	96
Figura 4.9. Relaciones de PROMÉTHÉE I (I) donde a y b son opciones, $\phi^+(a)$ es el flujo de categoría dominante, $\phi^-(a)$ es el flujo de categoría inferior, P^I, I^I y R^I indican preferencia, indiferencia e incomparabilidad, respectivamente	97
Figura 5.1. Consumo de bolsas de polietileno, PE, en México	101

Figura 5.2. Orden jerárquico (“ranking”) completo para las opciones propuestas	112
Figura 5.3. Plano GAIA para el caso de las bolsas para transporte de mercancías	113
Figura 5.4. Orden jerárquico (“ranking”) completo, sin aquellas opciones provenientes del gas natural húmedo	113
Figura 5.5. Plano GAIA para las opciones, excluyendo aquellas provenientes del gas natural húmedo	114
Figura 5.6. Orden jerárquico (“ranking”) completo para las opciones provenientes del gas natural húmedo	114
Figura 5.7. Plano GAIA para las opciones provenientes del gas natural húmedo	115
Figura 5.8. Orden jerárquico (“ranking”) completo, en relación a toneladas de material	116
Figura 5.9. Plano GAIA, en relación a toneladas de material	116
Figura 5.10. Diagrama de exergía para el ciclo de vida de una bolsa de polipropileno	117
Figura 5.11. Diagrama de exergía para el ciclo de vida de una bolsa de algodón	118
Figura 5.12. Diagrama de exergía para el ciclo de vida de 900 bolsas de polietileno de alta densidad a partir de petróleo crudo	118
Figura A1.1. Unidad repetitiva del polietileno	129
Figura A1.2. Proceso de partícula de Phillips	133
Figura A1.3. Polietileno de baja densidad por medio de la polimerización de etileno en un reactor tubular	136
Figura A1.4. Proceso de “calandreo”	138
Figura A1.5. Escala de tiempo relativa para la degradación de polímeros en diferentes ambientes	139
Figura A1.6. Estructura repetitiva del polipropileno	141
Figura A1.7. Estructuras espaciales del polipropileno	143
Figura A1.8. Polipropileno por polimerización en suspensión	146
Figura A1.9. Producción de polipropileno en México	147
Figura A1.10. Participación en la producción mundial de algodón, periodo 2009/2010	151
Figura A1.11. Importación total de papel tipo Kraft	153
Figura A1.12. Representación de las principales operaciones que se realizan en la elaboración de papel tipo Kraft	158
Figura A2.1. Cadena de producción de polietileno de baja densidad a partir de gas natural húmedo	160
Figura A2.2. Cadena de producción de polietileno de alta densidad a partir de gas natural húmedo	164
Figura A2.3. Cadena de producción de polipropileno	167
Figura A2.4. Configuración de la refinería base	168

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Sucesos importantes en la definición del desarrollo sostenible	30
Tabla 1.2. Cartera actual de proyectos de mecanismos de desarrollo limpio, MDL, en México	38
Tabla 1.3. Composición de la basura en México	45
Tabla 2.1. Comparación entre energía y exergía	63
Tabla 4.1. Tabla de evaluación multicriterio donde a , a_1 - a_n representan opciones y $g_1(a_1)$ - $g_k(a_n)$ la evaluación del criterio g_1 sobre la opción a_1 , hasta el g_k sobre la opción a_n	89
Tabla 4.2. Funciones de preferencia, P , para el criterio j a través de d_j (a, b) = $g_j(a)$ - $g_j(b)$	93
Tabla 5.1. Principales características de las bolsas analizadas	102
Tabla 5.2. Análisis de exergía para el polietileno de baja densidad, PEBD, partiendo de gas natural húmedo	106
Tabla 5.3. Análisis de exergía para el polietileno de baja densidad, PEBD, partiendo de petróleo crudo	106
Tabla 5.4. Análisis de exergía para el polietileno de alta densidad, PEAD, partiendo de gas natural húmedo	107
Tabla 5.5. Análisis de exergía para el polietileno de alta densidad, PEAD, partiendo de petróleo crudo	107
Tabla 5.6. Análisis de exergía para el polipropileno, PP	108
Tabla 5.7. Análisis de exergía para algodón sin blanquear	108
Tabla 5.8. Análisis de exergía para papel tipo Kraft sin blanquear	108
Tabla 5.9. Resultados para cada uno de los criterios de cada opción a evaluar	110
Tabla 5.10. Distribución de “pesos” para los criterios	119
Tabla A1.1. Propiedades del polietileno de alta densidad	132
Tabla A1.2. Propiedades del polietileno de baja densidad	136
Tabla A1.3. Propiedades del polipropileno isotáctico	143
Tabla A1.4. Consumo mundial de plásticos en el 2006	147
Tabla A2.1. Energía y emisiones para el aditivo degradante	175
Tabla A2.2. Consumo de recursos y emisiones para la fabricación de un kilogramo de algodón sin blanquear	175
Tabla A2.3. Consumo de recursos y emisiones para la fabricación de un kilogramo de papel tipo Kraft sin blanquear	176
Tabla A2.4. Valores de exergía química estándar utilizados	177
Tabla A2.5. Valores calculados de la exergía de los polímeros naturales	177
Tabla A2.6. Resultados del balance de exergía para la refinería	178
Tabla A2.7. Resultados del balance de exergía para el Centro Procesador de Gas	179
Tabla A2.8. Resultados del balance de exergía para la obtención de polietileno de alta densidad a partir de etileno	179
Tabla A2.9. Parámetros económicos	180
Tabla A2.10. Resumen de resultados	181

RESUMEN

El desarrollo sostenible surge como un concepto que condiciona el uso de recursos a que las generaciones futuras tengan la misma oportunidad de bienestar que tienen las generaciones presentes. El desarrollo sostenible procura entonces el uso racional y eficiente de los recursos. Como una aportación para lograr y mantener el desarrollo sostenible, la presente tesis explora la eficiencia en la utilización de los recursos naturales y energéticos a través del concepto de exergía. Esto es posible ya que la exergía es definida como el máximo trabajo que se puede aprovechar de los recursos. La reducción en la exergía durante el ciclo de vida completo permite evaluar el grado de perfección termodinámica de los procesos de producción, lo cual conduciría al análisis de las rutas de producción con mejor desempeño termodinámico. Para complementar el análisis, se analizaron otros criterios además de la reducción de exergía: la cantidad de recursos fósiles consumidos, la cantidad de energía consumida, la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero y como factor económico se presenta el valor del producto. Con estos criterios se desarrolla una metodología para evaluar procesos, cadenas de producción o bien productos y servicios. La metodología se aplicó en un estudio de caso, el cual consiste en la evaluación de opciones de materiales aptos para ser utilizados en la fabricación de bolsas para el transporte de mercancías, buscando la posible sustitución de las bolsas desechables de polietileno. Se analizaron el algodón, el papel tipo Kraft, el polipropileno, el polietileno de alta y de baja densidad (partiendo tanto de petróleo crudo como de gas natural húmedo como los recursos iniciales) y éstos polietilenos con un aditivo que induce la degradación. De las opciones propuestas para el estudio de caso, las que presentaron mejor rendimiento son aquellas que en vez de tener un uso final corto son utilizadas repetidas veces. Estas bolsas corresponden a las manufacturadas con algodón y polipropileno. Para el caso de bolsas desechables, el material con el mejor desempeño es el polietileno de alta densidad proveniente de petróleo crudo. La metodología desarrollada en esta tesis comprobó ser de ayuda para las comparaciones entre diversos materiales con la misma función y puede ser aplicada para cualquier proceso, producto o servicio o cadena de producción donde se requiera evaluar el desempeño ambiental, criterios económicos y el uso eficiente de energía.

ABSTRACT

Sustainable development arises as a concept to condition the use of resources so that future generations have the same opportunity of well-being as the present generation. Sustainable development aims to the rational and efficient use of resources. As a contribution to achieving and maintaining sustainable development, this thesis explores the efficient use of energy and natural resources through the concept of exergy. This is possible because exergy is defined as the maximum work that can be obtained from resources. The reduction in exergy during the entire life cycle enables to assess the degree of thermodynamic perfection of the production processes, which lead to the analysis of production routes with better thermodynamic performance. To complement the analysis, other criteria in addition to exergy reduction are also considered: the amount of fossil fuels consumed, the amount of energy consumed, the amount of emissions of greenhouse gases and the product value as an economic factor. With these criteria a methodology for assessing processes, production lines or products and services was developed. The methodology was applied to a case study which is evaluating options of materials suitable for use in the manufacture of bags for the transport of goods, looking for possible replacement of disposable polyethylene bags. Cotton, Kraft-type paper, polypropylene, high and low density polyethylene (from both crude oil and natural gas as initial resources) and these polyethylenes with an additive that induces degradation were analyzed. Of the options proposed for the case study, the ones that showed better performance are those that instead of having a short end-use are used repeatedly. These bags are manufactured with cotton and polypropylene. In the case of disposable bags, the material with the best performance is high density polyethylene from crude oil. The methodology developed in this thesis proved to be helpful for comparisons between different materials with the same function and can be applied to any process, product or service or production line where it is required to assess the environmental performance, economic factors and efficient use of energy.

NOMENCLATURA

a_i = i-ésima opción

ACV = análisis de ciclo de vida

ACVE = análisis de ciclo de vida exergético

Aeu = unidad exergética americana (American exergetic unit, por sus siglas en inglés)

AJM = proceso analítico jerárquico (analytic hierarchy process, por sus siglas en inglés)

ALDF = Asamblea Legislativa del Distrito Federal

ASTM = American Society for Testing Materials

b = disponibilidad termodinámica

b_i = i-ésima opción

b/d = barriles por día

bl = barril

bpce = barriles de petróleo crudo equivalente

BTU = unidad térmica británica (British thermal unit, por sus siglas en inglés)

BTUe = unidad térmica de exergía británica (British thermal unit of exergy, por sus siglas en inglés)

c = velocidad de la luz

C = fracción masa de carbono

CAEx = consumo acumulado de exergía

cal = calorías

cale = calorías de exergía

CANACINTRA = Cámara Nacional de la Industria de la Transformación de México

CAP = Consejo Agrario Permanente de México

CCE = Consejo Coordinador Empresarial de México

CEP = Centro Empresarial del Plástico de México

CER = certificado de reducción de emisiones (certificate of emissions reduction, por sus siglas en inglés)

CExC = consumo acumulado de exergía (cumulative exergy consumption, por sus siglas en inglés)

CFC = clorofluorocarburos

CIP = coeficiente insumo-producto

CNC = Confederación Nacional Campesina de México

CONCAMIN = Confederación de Cámaras Industriales de México

COP = Conferencia de las Partes (Conference of Parties, por sus siglas en inglés)

C_p = capacidad calorífica a presión constante

CPG = Centro Procesador de Gas de Petróleos Mexicanos

CRETIB = Acrónimo por corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o ser agentes biológico-infecciosos

CT = Congreso del Trabajo de México

d_j = función d

DOF = Diario Oficial de la Federación de México

E = energía

E (prefijo) = exa (10^{18})

EEUU = Estados Unidos

e.g. = por ejemplo (en latín *exempli gratia*)

EOLSS = Enciclopedia de sistemas de soporte de vida (Encyclopedia of Life Support System, por sus siglas en inglés)

EPA = Agencia de Protección Ambiental de EEUU (Environmental Protection Agency, por sus siglas en inglés)

Ex = exergía

F_j = función F

FAO = Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (Food and Agriculture Organization, por sus siglas en inglés)

G = energía de Gibbs

g_j = evaluación del criterio j

$g_j(a_i)$ = evaluación del criterio j sobre la i -ésima opción

GEI = gases de efecto invernadero

GER = necesidad bruta de energía (gross energy requirement, por sus siglas en inglés)

GIEC = Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático

GNH = gas natural húmedo

GODF = Gaceta Oficial del Distrito Federal de México

H = entalpía

H = fracción masa de hidrógeno

HDPE = polietileno de alta densidad (high density polyethylene, por sus siglas en inglés)

HFC = hidrofluorocarburos

I = irreversibilidad

I = indiferencia

IEA = Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency, por sus siglas en inglés)

IEJ = Instituto de Estudios Jurídicos de México

IM = métodos interactivos (interactive methods, por sus siglas en inglés)

INE = Instituto Nacional de Ecología de México

INEGI = Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática de México

IPN = Instituto Politécnico Nacional de México

IPQ = industria petroquímica

ISO = Organización Internacional para la Estandarización (International Organization for Standardization, por sus siglas en inglés)

ITESM = Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey de México

J = Joule

J_e = Joule de exergía

k (prefijo) = kilo (10^3)

K = Kelvin

kT/a = miles de toneladas por año

LCA = análisis de ciclo de vida (life cycle assessment, por sus siglas en inglés)

LDPE = polietileno de baja densidad (low density polyethylene, por sus siglas en inglés)

LGEEPA = Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente de México

M (prefijo) = mega (10^6)

m = masa

MAUT = teoría de la utilidad multi-atributos (multi-attribute utility theory, por sus siglas en inglés)

MDL = mecanismo de desarrollo limpio

MEM = Movimiento Ecologista Mexicano

MMtpe = millones de toneladas de energético equivalente al petróleo

MXN = moneda nacional mexicana

N = fracción masa de nitrógeno

O = fracción masa de oxígeno

OCDE = Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
OECD = Organization for Economic Co-operation and Development, en inglés
OM = métodos de sobre-clasificación (outranking methods, por sus siglas en inglés)
ONU = Organización de las Naciones Unidas
OXO-PEAD (GNH) = polietileno de alta densidad (con agente degradante) proveniente de gas natural húmedo
OXO-PEAD (refinería) = polietileno de alta densidad (con agente degradante) proveniente de petróleo crudo
OXO-PEBD (GNH) = polietileno de baja densidad (con agente degradante) proveniente de gas natural húmedo
OXO-PEBD (refinería) = polietileno de baja densidad (con agente degradante) proveniente de petróleo crudo
P (prefijo) = peta (10^{15})
P = presión
 P_{∞} = presión parcial
 P = preferencia
p = límite estricto de preferencia
PCN = poder calorífico neto
PE = polietileno
PE + prodegradante = polietileno con aditivo que induce la degradación
PEAD = polietileno de alta densidad
PEAD (GNH) = polietileno de alta densidad proveniente de gas natural húmedo
PEAD (refinería) = polietileno de alta densidad proveniente de petróleo crudo
PEAMM, HMM-HDPE = polietileno de alta densidad y alta masa molecular, siglas en inglés
PEBD = polietileno de baja densidad
PEBD (GNH) = polietileno de baja densidad proveniente de gas natural húmedo
PEBD (refinería) = polietileno de baja densidad proveniente de petróleo crudo
PELBD, LLDPE = polietileno lineal de baja densidad, siglas en inglés
PEP = Programa Económico de Proceso (Process Economic Program, por sus siglas en inglés)
PET = poli(tereftalato de etileno), por sus siglas en inglés
PEUAMM, UHMMPE = polietileno de ultra alta masa molecular, siglas en inglés
PIB = producto interno bruto
PP = polipropileno
ppm = partes por millón
PROFEPA = Procuraduría Federal de Protección al Ambiente de México
PS = poliestireno, por sus siglas en inglés
PUMA = Programa Universitario de Medio Ambiente de la UNAM de México
PVC = cloruro de polivinilo, por sus siglas en inglés
Q = calor
q = límite de la indiferencia en la función de preferencia
R = constante de los gases ideales
R = incomparabilidad
r = criterio r
ref = refinería
ROI = retorno de la inversión (return on investment, por sus siglas en inglés)
RSU = residuos sólidos urbanos
s = valor intermedio de la preferencia, punto de inflexión

S = entropía

S = fracción masa de azufre

SEMARNAP = Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca de México

SEMARNAT = Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México

SENER = Secretaría de Energía de México

SETAC = Sociedad de Ecotoxicología y Química Ambiental (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, por sus siglas en inglés)

T = temperatura

U = energía interna

u.f. = unidad funcional

UNAM = Universidad Nacional Autónoma de México

UNEP = Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (United Nations Environment Programme, por sus siglas en inglés)

US\$ = dólares de Estados Unidos

v = velocidad

W = trabajo

w_j = ponderación del criterio

WCED = Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo (World Commission on Environment and Development, por sus siglas en inglés)

WRI = Instituto de Recursos Mundiales (World Resources Institute, por sus siglas en inglés)

WWF = Fondo Mundial para la Naturaleza (World Wide Fund for Nature, por sus siglas en inglés)

x = composición

z = posición

Subíndices

0 = estado de referencia

c = concentracional

ch = química

ch, i = química del componente i

el = elemento

f = formación

g = potencial

h = calor

i = inercial

j = entrada

k = salida

m = materia

p = térmica

ph = física

r = reaccional

s = sustancial

t = mecánica

v = cinética

w = trabajo

Superíndices

0 = estándar

+ = positiva

- = negativa

Símbolos griegos

Δ = cambio en la propiedad

φ = relación de exergía química al valor del poder calorífico neto de combustible

θ = factor de Carnot

η = eficiencia exergética

π = índice de preferencia

ϕ = relación de dominancia

ν = número de moles

Nota: esta tesis usa el punto decimal (DOF, 2009).

OBJETIVOS

Objetivo general

El objetivo principal de esta tesis es analizar la eficiencia energética de tecnologías diferentes a la del polietileno de alta y baja densidad para la manufactura, uso y disposición final de bolsas individuales distinguiendo los medios materiales y la cantidad y calidad de la energía usada manteniendo un desarrollo sostenible.

El objetivo planteado se logra a través de los siguientes objetivos específicos:

1. Mostrar que el análisis exergético es una herramienta útil en el logro de un desarrollo sostenible en términos de uso eficiente y ahorro de energía y recursos, en especial de aquellos no renovables.
2. Identificar la oferta de materiales ecológicos, principalmente obtenidos de tecnologías que utilicen fuentes no convencionales (diferentes al polietileno).
3. Aplicar el análisis de ciclo de vida exergético a la producción de bolsas personales de diferentes materiales, midiendo así la eficiencia energética de los procesos y del producto durante todo su ciclo de vida.
4. Calcular los efectos de emisión de CO₂ de las opciones estudiadas (incluyendo la actual) respecto a la energía utilizada en el ciclo de vida y los recursos naturales usados para la producción de los empaques propuestos y actuales.
5. Evaluar las opciones para la sustitución de la bolsa personal común fabricada con polietileno de alta y baja densidad.
6. Comparar los resultados obtenidos de la evaluación de cada una de las opciones propuestas para la fabricación de la bolsa de uso personal.

ALCANCES

Se consideran opciones que utilicen nuevos productos, tales como bolsas fabricadas con polímeros con tecnologías que los hagan fácilmente degradables. También se plantea el uso de la fibra de polipropileno, así como materiales obtenidos de fuentes renovables como el algodón y el papel. Los diferentes materiales serán comparados bajo diversos criterios: la utilización real de la energía en toda la cadena de producción, las pérdidas en la calidad de la energía (exergía), el consumo de materia prima, las emisiones al ambiente y el valor monetario de los productos, para así mediante la selección multicriterio ordenarlos de acuerdo con el mejor desempeño durante su ciclo de vida.

HIPÓTESIS

Existen opciones tecnológicas más eficientes en términos del uso sostenible de la energía y los recursos naturales y con una menor emisión de gases de efecto invernadero (GEI) para fabricar bolsas individuales, considerando el ciclo de vida completo de los productos, que las fabricadas de polietileno de baja y alta densidades.

Las consecuencias positivas y negativas relacionadas con cada una de las opciones podrán cuantificarse, clasificarse y jerarquizarse comprobando su eficiencia energética, económica y ambiental para el mediano y largo plazo.

Es posible realizar comparaciones con una misma unidad y base entre los materiales al relacionar la exergía del ciclo de vida de los productos.

La sustitución con materiales diferentes a los polietilenos, que ahorren energía y recursos naturales no renovables y con un menor número de emisiones GEI a la atmósfera en su ciclo de vida completo, podría representar una oportunidad para México.

INTRODUCCIÓN

La energía es fundamental en el desarrollo humano. A lo largo de la historia se descubrieron formas de aprovecharla, por ejemplo convirtiendo el calor en trabajo. A medida que la ciencia y la tecnología se desarrollaban más rápidamente y lograban muchas veces facilitar la vida cotidiana, se presentaron consecuencias ambientales, agotamiento de recursos y una mayor demanda energética. El estimado mundial de requerimientos energéticos en 1990 fue de 350 EJ ($E= 10^{18}$) y se espera se incremente entre 1100 EJ y 1400 EJ para el año 2030 (*Kapur, 1999*).

La presión causada por la sociedad en los ecosistemas a través del consumo humano de recursos naturales es evaluada y se puede encontrar en documentos como los reportes sobre el planeta publicados por el Fondo Mundial para la Vida Silvestre (*Anónimo, 2008a*) en EEUU y el Programa Ambiental de las Naciones Unidas. El reporte indica que, en el 2001, la humanidad consumió 21% por encima de la bio-capacidad de la Tierra (*Nguyen et al., 2005*). Es por lo anterior que en la presente tesis se toma como marco de referencia el desarrollo sostenible.

Suponiendo un rápido crecimiento económico mundial y un cambio hacia una mezcla equilibrada de fuentes de energía, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (GIEC) pronostica que las emisiones anuales de carbono se duplicarán para el año 2050. Los cálculos moderados de las Naciones Unidas indican que la población mundial ascenderá a 9,000 millones en el mismo período, mientras que las proyecciones de la FAO muestran un aumento en el consumo de alimentos, fibras y productos forestales (*Anónimo, 2008a*). Todo esto generaría consecuencias ambientales e implicaría un aumento en el consumo energético mundial.

Diversas acciones podrían disminuir el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente. Por ello, la principal hipótesis de este trabajo es que el uso eficiente de la energía, evitando el desperdicio de la misma así como de los recursos, son esenciales para alcanzar la sostenibilidad o sustentabilidad a mediano y largo plazos.

Hasta ahora el concepto desarrollo sustentable o sostenible involucra principalmente algunos principios generales. Muchas veces es utilizado para establecer costosos certificados como el ISO 14000, o ponerle "etiquetas verdes" a los productos, mientras que no existen medidas legales o conceptos y métodos efectivos para poder medir y darle un valor más objetivo a la situación ambiental. Lo anterior da una falsa impresión de que la situación ambiental está mejorando (*Wall*

y Gong, 2001). Sin embargo, el concepto creado por Brundtland y colaboradores (1987) que define al desarrollo sostenible como “*satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades*” es el que sirve de base en el presente trabajo.

El análisis de exergía surge como una combinación de la primera y la segunda leyes de la termodinámica y muestra la imperfección termodinámica del proceso, incluyendo todas las pérdidas de calidad de energía, las cuales no son consideradas en un balance de energía. Por medio de este análisis es posible identificar las áreas ya sea de un proceso o de una cadena de producción, de potencial de mejoramiento energético y así contribuir a un uso más eficiente de la energía. También es posible, como se propone en esta tesis, la comparación entre diferentes productos y, por lo tanto, diferentes tecnologías, para localizar la opción con una mayor eficiencia en la utilización de la energía y de los recursos naturales.

El objetivo de estudios acerca del desarrollo sostenible es encontrar criterios operacionales haciendo énfasis en el vínculo entre los servicios generados y los recursos utilizados. Esto hace que la exergía sea un buen indicador, ya que una eficiencia exergética alta se traduce en una menor cantidad de exergía desperdiciada y, por lo tanto, un menor daño al ambiente (Wall y Gong, 2001).

Una de las herramientas utilizadas para evaluar las consecuencias ambientales que se generan de algún producto, es el análisis de ciclo de vida (ACV), el cual es una metodología que intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto. Se desarrolla bajo el criterio de que los recursos energéticos y las materias primas no son ilimitados y que, normalmente, se utilizan más rápido de como se reemplazan o como surgen nuevas opciones. Por tal motivo, la conservación de recursos privilegia la reducción de la cantidad de residuos generados (Anónimo, 2003).

El ACV se aplicó, si no por primera vez, sí fue una de las primeras aplicaciones en la industria de envasado y empaçado. En 1969, fue cuando la compañía Coca Cola aplicó el concepto de cuantificación de materiales, la energía utilizada y la carga medioambiental derivada de los envases durante su ciclo de vida completo (Montero-Alpírez, 2006).

Hace tres décadas, la preocupación pública por los crecientes volúmenes de residuos sólidos, debido a la utilización de plásticos en el empaque y envasado y, más tarde, las preocupaciones

sobre el consumo de energía se convirtieron en los principales motores para estudiar los efectos de los envases y empaques en el medio ambiente (*Sonneveld, 2000*).

Diferentes agencias noticiosas e incluso la Academia de Ciencias de los Estados Unidos (EEUU) han estado informando sobre esta problemática.

Por ejemplo, en lo que se refiere a las bolsas de polietileno que se ofrecen en los supermercados o en cualquier tienda donde se necesite un empaque para transportar lo que se compra, la Agencia Ambiental de los Estados Unidos calculó un consumo en 2003 de 500,000 a mil millones de bolsas; de las cuales menos del 1% se recicla, sea porque no es posible o porque el costo de reciclado es muy superior a la producción de una nueva bolsa (*Anónimo, 2008b*).

En México, el consumo de bolsas de polietileno (alta y baja densidad) es de aproximadamente 600,000 ton/año, lo que equivale aproximadamente al consumo de 106,000 millones de bolsas/año. Del consumo total de polietileno, un porcentaje importante se destina a la fabricación de bolsas; en el 2009, 56% del consumo de polietileno de baja densidad y 33% del de alta densidad fue destinado a la manufactura de bolsas desechables (*CEP, 2010*).

Asimismo, el Gobierno del Distrito Federal, publicó el 18 de agosto de 2009 en la Gaceta Oficial el decreto por el cual se modifican varios artículos de la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (*GDF, 2009*).

Esta ley indica en su Artículo 26 Bis “Los establecimientos mercantiles no podrán otorgar a título gratuito para la transportación, contención y envase de los productos y/o servicios que presten ó comercialicen bolsas de plástico.”

Teniendo como marco de referencia el desarrollo sostenible y las intersecciones con los conceptos termodinámicos y la conservación de recursos naturales no renovables, este trabajo explora el rol que tiene la utilización de la energía dentro del desarrollo sostenible y las posibilidades de aumentar la eficiencia energética.

Este estudio contempla la selección de productos a través de sus procesos de producción así como de su factibilidad económica, de su sostenibilidad ecológica y de su capacidad de sustitución de los materiales actuales, comparando tecnologías de obtención de productos provenientes de fuentes renovables y no renovables a través de su ciclo de vida.

Desde el punto de vista científico, esta investigación se ocupa de los análisis de los balances de energía, de exergía y de materias primas de los plásticos utilizados para la manufactura de bolsas. Considerando el mismo análisis, se evalúan también algunos materiales considerados para la sustitución de dichos productos tales como el algodón y el papel tipo Kraft como muestras representativas del uso de recursos renovables y las bolsas manufacturadas con polietileno pero incluyendo un aditivo que induce a su degradación y, por último, el polipropileno como otro de los polímeros que podría ser utilizado por su mayor duración en su ciclo de vida útil.

La pérdida de exergía durante todo el ciclo de vida se presenta como una herramienta en el análisis comparativo de productos; asimismo, la energía real consumida y los recursos naturales utilizados en cada caso, durante el ciclo de vida, son criterios indispensables en el marco de la ayuda a la toma de decisiones de reemplazar o no a las actuales bolsas de polietileno con cualquiera de las opciones de sustitución ya mencionadas. Debido a que los criterios para seleccionar la mejor opción son varios, entonces la toma de decisiones deberá ayudarse utilizando una metodología con criterios múltiples.

CAPÍTULO I

MARCO DE REFERENCIA: DESARROLLO SOSTENIBLE Y SU RELACIÓN CON LA ENERGÍA Y EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Este primer capítulo introduce el concepto de desarrollo sustentable o sostenible, partiendo de definiciones previas realizadas por organismos internacionales a través de programas y/o proyectos sobre el medio ambiente; expone también, el papel de la energía dentro de este concepto, así como la importancia de su uso racional. Por último, se introduce el análisis de ciclo de vida como una herramienta útil en los estudios ambientales. Son precisamente estos conceptos los que llevan a desarrollar estudios como el aquí presentado.

1.1 Introducción

El concepto de desarrollo sostenible es ya un tema actual y bastante estudiado, al igual que hablar de ecología o de contaminación. Sin embargo, muchas veces no se conoce la amplitud del término y cómo ha ido evolucionando.

Para empezar, se puede considerar como punto de partida el término “desarrollo”. Éste muchas veces se relaciona con las sociedades humanas como sinónimo de “avance” o de “crecimiento económico”. Se trata de un término que implica una mayor o menor capacidad económica y de aparente bienestar.

Por su parte, el desarrollo sostenible surge más bien como una necesidad ante los retos ambientales que se evidenciaron al irse acumulando el deterioro del medio ambiente, conjugándose en él los conceptos económico-sociales del desarrollo con la sostenibilidad ecológica.

1.2 Definición de desarrollo sostenible

El término desarrollo sostenible o sustentable fue formalizado por primera vez en el documento conocido como Informe Brundtland (1987), fruto de los trabajos de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas, creada en la Asamblea de ésta en 1983. Dicha definición se asumiría en el Principio tercero de la Declaración de Río (Anónimo, 1992a):

“Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades”

El informe fue el resultado de dos décadas de trabajo en donde se identificó que no se pueden considerar sostenibles sociedades y economías saludables en un mundo con tanta pobreza y degradación del medio ambiente. Si bien el desarrollo económico de las naciones no se puede detener, es necesario que sea menos desigual desde el punto de vista socioeconómico y menos destructivo en el sentido ecológico. La Comisión estableció que la economía global, con el hecho de satisfacer las necesidades y deseos de la sociedad, tiene como prioridad los límites ecológicos del planeta y las necesidades de las generaciones futuras (Santoyo-Hernández, 2006).

Por su parte, la FAO (Food and Agriculture Organization) define como desarrollo agropecuario y rural sostenible a *“la administración y conservación de la base de recursos naturales y la orientación de los cambios tecnológicos e institucionales de tal forma que aseguren el logro y la satisfacción permanentes de las necesidades humanas del presente y de las futuras generaciones. Dicho desarrollo sostenible conserva la tierra, el agua, los recursos genéticos de los reinos animal y vegetal, no degrada el medio ambiente, es tecnológicamente apropiado, económicamente viable y socialmente aceptable”* (Anónimo, 1992b).

El objetivo del desarrollo sostenible es principalmente el de reconciliar los aspectos económico, social y ambiental implicados en las actividades humanas, muestra el compromiso que debe tener la humanidad para generar una relación entre la naturaleza y la sociedad donde se utilicen los recursos renovables y no renovables apropiadamente, se ocasione el menor o hasta ningún daño a los ecosistemas y se distribuyan justa, racional y equitativamente los beneficios de la economía.

Entre los recursos no renovables que deben alcanzar un nivel de sostenibilidad están los diferentes tipos de energía primaria¹, principalmente hidrocarburos (petróleo y gas natural) y carbón.

Contribuyendo a lo anterior, se busca en esta tesis la conservación de los recursos naturales, en especial el petróleo y el gas natural, involucrado principalmente en dos etapas: en su uso para la generación de energía necesaria para los procesos de producción y cuando se utilizan como insumo en la cadena de producción².

1.3 Condiciones para un desarrollo sostenible

De manera general, se puede decir que el desarrollo sostenible no se logra sin disponer de los recursos, tanto económicos como naturales, necesarios para cubrir las diversas necesidades

¹ Una fuente de energía primaria es aquella forma de energía que se encuentra disponible en la naturaleza antes de ser convertida o transformada.

² Se entenderá por cadena de producción al conjunto de procesos necesarios para obtener un determinado bien o servicio.

humanas, al mismo tiempo que se protegen estos recursos a fin de asegurar su permanencia futura, sin dejar de utilizarlos.

El aspecto más importante para esta tesis es el de la sostenibilidad energética, la cual se puede lograr, por ejemplo, en el caso de la industria de la generación de energía, investigando, diseñando y utilizando tecnologías que consuman igual o menor cantidad de energía que aquella que producen. En el caso de otras áreas o industrias se puede conseguir tomando medidas que conlleven al no desperdicio y el uso eficiente³ de la misma. Es por esto que, como en el presente estudio, identificar productos con la misma función y analizarlos para así seleccionar aquel con una mejor utilización de la energía, de los recursos naturales y una menor cantidad de emisiones al ambiente, ayuda a lograr el desarrollo sostenible, buscando que dicha sustitución sea económicamente viable y ambientalmente represente una mejoría.

Dada la naturaleza agotable de los recursos, en especial aquellos no renovables, existen límites o restricciones en cuanto a la intensidad de su uso. Dichos límites deben ser siempre tomados en cuenta. Dicho de otra forma: ningún recurso renovable deberá utilizarse a un ritmo superior al de su generación, ningún contaminante deberá producirse a un ritmo superior al que pueda ser reciclado, neutralizado o absorbido por el medio ambiente y ningún recurso no renovable deberá aprovecharse a mayor velocidad de la necesaria para sustituirlo por un recurso renovable utilizado de manera sostenible.

Con base en las definiciones presentadas se puede decir que el desarrollo sostenible es posible, que debe ser aplicado al manejo de la economía, la tecnología y los recursos naturales y que el desarrollo y el bienestar social están limitados por el nivel tecnológico, los recursos del medio ambiente y la capacidad del medio ambiente para absorber los efectos negativos, como la contaminación, provocados por las actividades humanas.

Dentro de este concepto se han identificado tres pilares interdependientes que se refuerzan mutuamente: ambiental, económico y social. Estos tres ámbitos son importantes precisamente por las relaciones que guardan entre sí como se observa en la Figura 1.1.

³ El término eficiencia se define como la capacidad de disponer de un recurso para obtener un efecto determinado, en el Capítulo II se dará una definición más amplia.

Como se puede ver en el esquema, es importante la relación entre estas tres áreas, la intersección entre el social y el económico denotan la calidad de vida de la población, a través de la satisfacción de las necesidades básicas de alimentación, vestido, vivienda y salud. A su vez, las limitaciones del desarrollo económico son delimitadas por las condiciones ambientales y los impactos causados en el medio, por lo que el ámbito ecológico es de vital importancia. El conjunto de la esfera social con la ecológica ayuda también a la creación de una conciencia ambiental, para entonces conocer el entorno, cuidarlo y así preservarlo.

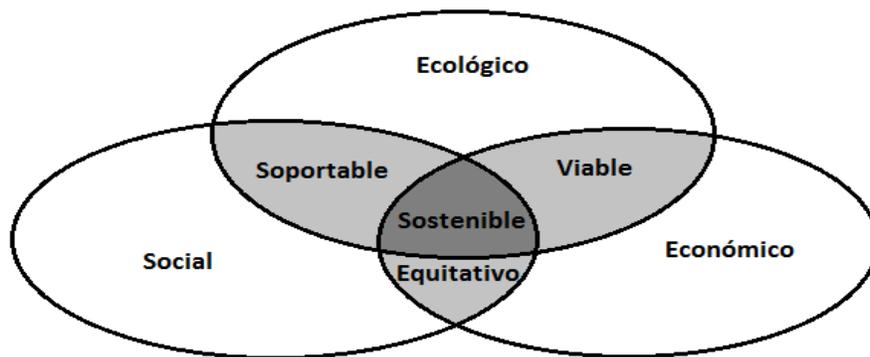


Figura 1.1. Elementos principales para el desarrollo sostenible. Fuente: *Página electrónica de la FAO (Anónimo, 2009a)*

Por lo anterior, no se podría hablar de desarrollo sostenible si hay un desequilibrio ecológico, la inexistencia de un desarrollo económico o la existencia de inequidad social.

El término desarrollo sostenible reúne dos líneas de pensamiento en torno a la gestión de las actividades humanas: una de ellas concentrada en las metas de desarrollo y la otra en el control de los impactos dañinos de las actividades humanas sobre el ambiente.

En forma esquemática, la Figura 1.2 muestra los factores que intervienen en el desarrollo sostenible. En este diagrama se consideran las actividades humanas como parte de los ecosistemas, que ejercen acción sobre el medio ambiente. Las necesidades humanas pueden ser vistas como generadoras de demanda, mientras que la disponibilidad de los recursos naturales es

la oferta para esta demanda. Ambas variables se asocian a los procesos de producción, los cuales transforman las materias primas en productos y servicios para el consumo humano.

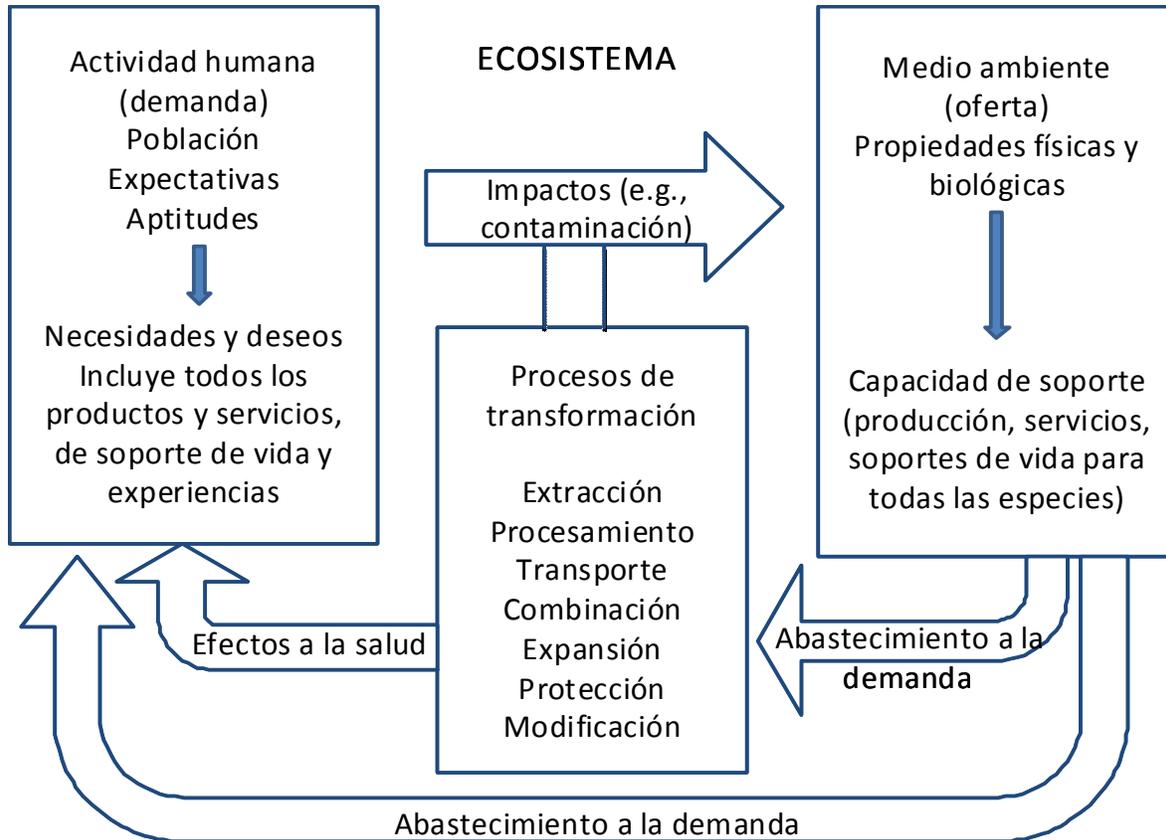


Figura 1.2. Relación entre las actividades humanas y los recursos naturales. Fuente: Manning et al., 1990

El cambio ambiental surge de los procesos productivos, los cuales además de reducir la cantidad de recursos naturales disponibles para su transformación, devuelven al medio contaminantes en forma de desechos, emisiones y subproductos. Es por esto que mientras menor sea la cantidad de recursos naturales y energéticos que se utilicen para producir un bien, y deseablemente también se emitan una menor cantidad de contaminantes, será preferible la manufactura de este bien, sobre los demás que se destinen a cumplir la misma función, como se plantea en los objetivos de esta tesis.

Concluyendo, se pueden tomar como puntos críticos para analizar y proponer medidas en este concepto: el agotamiento de los recursos naturales y la explotación excesiva de los mismos (como las materias primas y los combustibles fósiles), especialmente los no renovables, la destrucción y fragmentación de los ecosistemas, la pérdida de diversidad biológica y el cambio climático. Por todo lo anterior, se reduce la capacidad de resistencia del planeta a los cambios.

1.4 Cronología

A continuación se presenta la Tabla 1.1, la cual presenta a manera de resumen algunos de los sucesos y reuniones importantes, expuestos de manera cronológica, en los que se ha buscado el desarrollo sostenible.

Como continuación de estas reuniones, se ha planteado que se lleve a cabo una nueva reunión en México, del 29 de noviembre al 10 de diciembre de 2010, la XVI Conferencia de las Partes de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) sobre Cambio Climático (COP-16), en la que se busca discutir, difundir y compartir información sobre la problemática del cambio climático y las cumbres relacionadas.

1.5 México ante el desarrollo sostenible

En México se han realizado estudios al respecto y se han tomado medidas para lograr conciliar las actividades humanas con una actitud de respeto hacia el medio ambiente y la conservación de los recursos naturales.

Según la Tercera Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, elaborado por el INE (Instituto Nacional de Ecología) en 2006, en el caso de México, durante el periodo de 2020 a 2080, la temperatura se elevará entre 2 y 4 grados centígrados; en consecuencia, la reducción de las precipitaciones pluviales en invierno

Tabla 1.1. Sucesos importantes en la definición del desarrollo sostenible. *Fuente: Elaboración propia*

AÑO	EVENTO	PROPÓSITO/CONSECUENCIAS
1968	Creación del Club de Roma	Reúne personas importantes que buscan la promoción de un crecimiento económico estable y sostenible de la humanidad
1972	Informe: <i>"Los límites del crecimiento"</i>	Publicado por el Club de Roma, presenta los resultados de las simulaciones de la evolución de la población humana sobre la base de la explotación de los recursos naturales, con proyecciones hasta el año 2100
1984	Primera reunión de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo	Establecer una agenda global para el cambio
1987	Informe Brundtland <i>"Nuestro Futuro Común"</i>	Se formaliza por primera vez el concepto de desarrollo sostenible
1992	Río de Janeiro, Brasil. Segunda <i>"Cumbre de la Tierra"</i>	Se crea la Agenda 21, se aprueban el Convenio sobre el Cambio Climático, el Convenio sobre la Diversidad Biológica (Declaración de Río) y la Declaración de Principios Relativos a los Bosques
1997	Kioto, Japón. <i>"Conferencia de las Partes (COP.3)"</i>	Se estableció el compromiso de lograr una reducción de emisiones netas de gases de efecto invernadero para los países desarrollados, incluyendo en ellos a los países en tránsito a economías de mercado. Este Protocolo fue firmado por 160 países y entró en vigor en 2005
2002	Johannesburgo, Sudáfrica. Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible <i>"Rio +10"</i>	Se dio un nuevo ímpetu a la acción global para la lucha contra la pobreza y la protección del medio ambiente; se señalaron cinco esferas fundamentales en las que se podría lograr un verdadero cambio: 1) agua y saneamiento, 2) energía, 3) salud, 4) agricultura y 5) diversidad biológica
2007	Bali, Indonesia	Con el fin de redefinir el Protocolo de Kioto y adecuarlo a las nuevas necesidades respecto al cambio climático, en esta cumbre intervienen los Ministros de Medio Ambiente de casi todos los países del mundo aunque Estados Unidos y China (los dos principales emisores y contaminantes del planeta) se niegan a suscribir compromisos

alcanzaría hasta un 15% en la región centro y hasta un 5% en la región del Golfo. En verano las lluvias podrían disminuir hasta un 5% en la parte centro; de igual forma, se produciría un retraso en la temporada de lluvias hacia el otoño en gran parte del país (INE, 2006).

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente fue aprobada en 1988 y en su artículo 3° fracción XI define al Desarrollo Sostenible como (LGEEPA, 2010):

"El proceso evaluable mediante criterios e indicadores de carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras".

Como consecuencia de la ley mencionada, en diciembre de 1994 se creó la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) como la institución responsable del diseño de políticas públicas para la conservación de la naturaleza y el desarrollo sostenible. Entre sus funciones estaban el cuidado y la atención de diversos aspectos ambientales, como el establecimiento de áreas naturales protegidas, la calidad del aire, la política en materia de desechos peligrosos, la vida silvestre, el ordenamiento ecológico y el impacto ambiental, el cambio climático, la regulación y preservación del medio ambiente, la pesca, los bosques, el agua, los suelos, la educación y cultura ambientales, entre otros, con el objetivo prioritario de revertir la precariedad del medio ambiente.

Los mecanismos clave de coordinación para el desarrollo sostenible nacional son el Consejo Consultivo Nacional y cuatro Consejos Consultivos Regionales creados mediante decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación el 21 de abril de 1995. Además de la actual SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), están involucradas: la Secretaría de Desarrollo Social, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación y las Cámaras de Diputados y de Senadores.

La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), como órgano descentralizado de la SEMARNAT, vigila el cumplimiento de las disposiciones legales relacionadas con el ordenamiento

ecológico, el impacto ambiental y la ocupación de la zona federal marítimo terrestre, así como la atención a contingencias ambientales de los recursos naturales.

1.5.1 Órganos e instituciones *(Alcocer-Barrera, 2007)*

Los órganos e instituciones paraestatales involucrados, así como la participación de los sectores académico y privado son: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Instituto Politécnico Nacional (IPN), Instituto de Estudios Jurídicos (IEJ); organismos empresariales: Cámara Nacional de la Industria de la Transformación (CANACINTRA), Confederación de Cámaras Industriales (CONCAMIN), Consejo Coordinador Empresarial (CCE); Organizaciones sociales: Congreso del Trabajo (CT), Consejo Agrario Permanente (CAP), Confederación Nacional Campesina (CNC). Las organizaciones no gubernamentales participantes son: Pronatura, Grupo de los Cien, Movimiento Ecológico Mexicano (MEM), y el Pacto de Grupos Ecológicos.

1.5.2 Leyes *(Alcocer-Barrera, 2007)*

Entre las leyes, que están en permanente modificación y complementación ante las cambiantes circunstancias y condiciones productivas, se encuentran: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Ley de Aguas Nacionales, Ley Orgánica de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, Ley General de Pesca y Acuicultura Sostenibles, Ley de Seguridad de Organismos Genéticamente Modificados, Ley de Desarrollo Rural Sostenible, Ley de Desarrollo Sostenible de la Caña de Azúcar, Ley de Energía para el Campo, Ley de la Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas, Ley de Productos Orgánicos, Ley Federal del Mar, Ley General de Asentamientos Humanos, Ley General de Desarrollo Forestal Sostenible, Ley General de Desarrollo Social, Ley General de Vida Silvestre, Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, Ley General de Bienes Nacionales y Ley de Suelos, entre otras.

1.5.3 La UNAM y el desarrollo sostenible

Para lograr la sostenibilidad, la ciencia, la tecnología, la innovación y la educación son fundamentales en el impulso de una concepción más clara de la dimensión ambiental y su impacto en el terreno económico, político y social. Es por esto que las universidades del país tienen el compromiso de emplear sus recursos materiales y humanos en el desarrollo de nuestra sociedad.

Ante tal situación, la UNAM ha promovido y apoyado la creación de infraestructura y la formación de recursos humanos, lo que ha permitido el desarrollo de manera muy diversificada de las Ciencias Ambientales, de tal forma que fue necesario crear una estructura transversal organizativa denominada Programa Universitario de Medio Ambiente (PUMA), el cual pertenece a la Coordinación de la Investigación Científica. A través del PUMA, la UNAM cumple con su compromiso ante la sociedad y atiende las demandas de la sociedad, así como las de instituciones públicas y privadas que se lo solicitan. Como parte de su compromiso con la conservación y el manejo ambiental; el PUMA en la UNAM forma parte del comité técnico de la reserva del Pedregal de San Ángel y de la Comisión de Salud, Protección Civil y Manejo Ambiental, desarrollando el programa *“Por UNAMambiente sin basura”*.

En los últimos años, el PUMA ha enfatizado la importancia del trabajo universitario en detener o revertir los procesos de degradación ambiental, mediante estudios y proyectos que han propuesto soluciones científicas y tecnológicas a problemas específicos en materia de conservación y protección del ambiente (*Anónimo, 2009b*).

1.6 Mecanismos de Kioto

En un esfuerzo por reducir las emisiones que provocan el cambio climático en el planeta, como el calentamiento global o efecto invernadero, los principales países industrializados -a excepción de Estados Unidos y de China- firmaron el protocolo de Kioto como un acuerdo de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Para cumplir se están financiando proyectos de

captura o abatimiento de estos gases en países en vías de desarrollo, acreditando tales disminuciones a un país desarrollado.⁴

Es así como dentro del Protocolo de Kioto se agregaron tres mecanismos internacionales denominados “*Mecanismos de Flexibilidad*”, cuyo objetivo es posibilitar a los países que asumieron obligaciones, el cumplimiento de las mismas a costos mínimos (*Aversano y Temperini, 2006*). Estos mecanismos son:

- **Mecanismo de implementación conjunta**

Se refiere a la posibilidad de que un país ‘Anexo I’⁵ financie proyectos de reducción (o captura) de emisiones en otro país de Anexo I que se encuentre en transición hacia una economía de mercado, y tal reducción sea atribuida y contabilizada al primero.

- **Comercio de derechos de emisión**

Se refiere a la venta de derechos de emisión entre países del ‘Anexo I’. Este caso se aplica cuando los esfuerzos de reducir sus emisiones por parte de un país ‘Anexo I’ han sido mayores que los requeridos por el compromiso, este país puede comerciar esos excedentes de derechos de emisión para que otro país también en el ‘Anexo I’ alcance de este modo sus objetivos de reducción.

- **Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)**

Permite a un país ‘Anexo I’ invertir en proyectos de reducción o captación de emisiones en un país ‘No Anexo I’ mediante la compra de CER (Certificates of Emissions Reduction) generados por dichos proyectos.

⁴ El fundamento ambiental de los mecanismos reside en el hecho de que el cambio climático es un problema de carácter global; por ello, el objetivo de la Convención y del Protocolo es alcanzar una reducción de los niveles globales de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, siendo indistinto el conseguir las reducciones en uno u otro país.

⁵ El ‘Anexo I’ lo conforman los siguientes países: Australia, Austria, Bielorrusia, Bélgica, Bulgaria, Canadá, República Checa, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Islandia, Irlanda, Italia, Japón, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Holanda, Nueva Zelanda, Noruega, Polonia, Portugal, Rumania, Rusia, España, Suecia, Suiza, Turquía, Ucrania, Reino Unido, Irlanda del Norte y Estados Unidos.

1.6.1 Los bonos de carbono

El nombre de “*bonos de carbono*” se ha dado como un nombre genérico a un conjunto de instrumentos que pueden generarse por diversas actividades de reducción de emisiones.

El sistema ofrece incentivos económicos para que empresas privadas contribuyan a la mejora de la calidad ambiental y se consiga regular la emisión generada por sus procesos productivos, considerando el derecho a emitir CO₂ como un bien canjeable y con un precio establecido en el mercado. La transacción de los bonos de carbono —un bono de carbono representa el derecho a emitir una tonelada de dióxido de carbono— permite mitigar la generación de gases invernadero, beneficiando a las empresas que no emiten o disminuyen la emisión y haciendo pagar a las que emiten más de lo permitido.

Las reducciones de emisiones de GEI se miden en toneladas de CO₂ equivalente⁶ y se traducen en Certificados de Emisiones Reducidas (CER: *Certificates of Emissions Reduction*). Un CER equivale a una tonelada de CO₂ que se deja de emitir a la atmósfera y puede ser vendido en el mercado de carbono a países pertenecientes al Anexo I. Los tipos de proyecto que pueden aplicar a una certificación son, por ejemplo, generación de energía renovable, mejoramiento de eficiencia energética de procesos, forestación y limpieza de lagos y ríos.

No hay un valor “oficial” sobre el precio de una tonelada de CO₂ reducida o no emitida. Aunque algunas agencias multilaterales han establecido ciertos precios para los proyectos de reducción de emisiones financiados por ellas mismas (por ejemplo, hasta 2005, el Banco Mundial empleó un precio de \$5 dólares por tonelada de CO₂ equivalente no emitida), aunque el precio de la tonelada está sujeto a oferta y demanda de bonos de carbono en el mercado.

Dado que existen diferentes esquemas para el comercio de los bonos y diferentes sitios del mundo donde se pueden comprar y vender, pueden existir precios diferentes por cada tonelada de CO₂.

⁶ La equivalencia del CO₂ surgió con el objetivo de comparar las consecuencias ambientales de diferentes gases de efecto invernadero, estas contribuciones al efecto invernadero se convierten a la cantidad de CO₂ necesaria para producir el mismo efecto que este gas en la atmósfera.

Los bonos de carbono permiten al desarrollador de un proyecto obtener un ingreso adicional por la venta en los mercados internacionales, derivado de la reducción de emisiones que el proyecto evita.

1.6.1.1 México y los bonos de carbono

El Instituto Nacional de Ecología ha estimado que México tiene un potencial de reducción y captura de emisiones cercana a los 81 millones de toneladas de CO₂/año entre el 2008 y 2012. Esto podría traducirse en ingresos de más de 480 millones de Euros anuales. Estos ingresos ayudarían a promover el desarrollo de proyectos en los sectores energético, industrial, agrícola y forestal (*Gallardo, 2005*).

En el sector industrial las mayores oportunidades están en el ahorro y uso eficiente de energía, así como en el aprovechamiento de energías renovables.

Cada año se intercambian 150 millones de Bonos de Carbono en todo el mundo; China, India y Brasil concentran el 70% del mercado. China participa con 65 millones, India con 23 y Brasil con 17. México participa con 6 millones al año, que equivalen a 1,500 millones de pesos anuales, el 3% del mercado mundial (*Anónimo, 2010c*). La Figura 1.3 muestra los principales países vendedores de bonos de carbono. Por otro lado, la Tabla 1.2 muestra los proyectos actuales de mecanismo de desarrollo limpio en México.

1.7 La energía dentro del marco del desarrollo sostenible

La energía es esencial en el desarrollo humano, se necesita para lograr cualquier actividad, proceso productivo o servicio. Es por esto que su disponibilidad posee un papel importante para la sociedad.

La importancia del consumo de energía en el sector industrial lleva a que ésta sea considerada un factor relevante, tanto por razones ecológicas como por la necesidad de herramientas adecuadas para reducir el costo que ésta representa para las empresas. Por lo tanto, es necesario analizar la

energía, sus fuentes y el uso de la misma, con especial atención dentro de un marco ambiental adecuado.

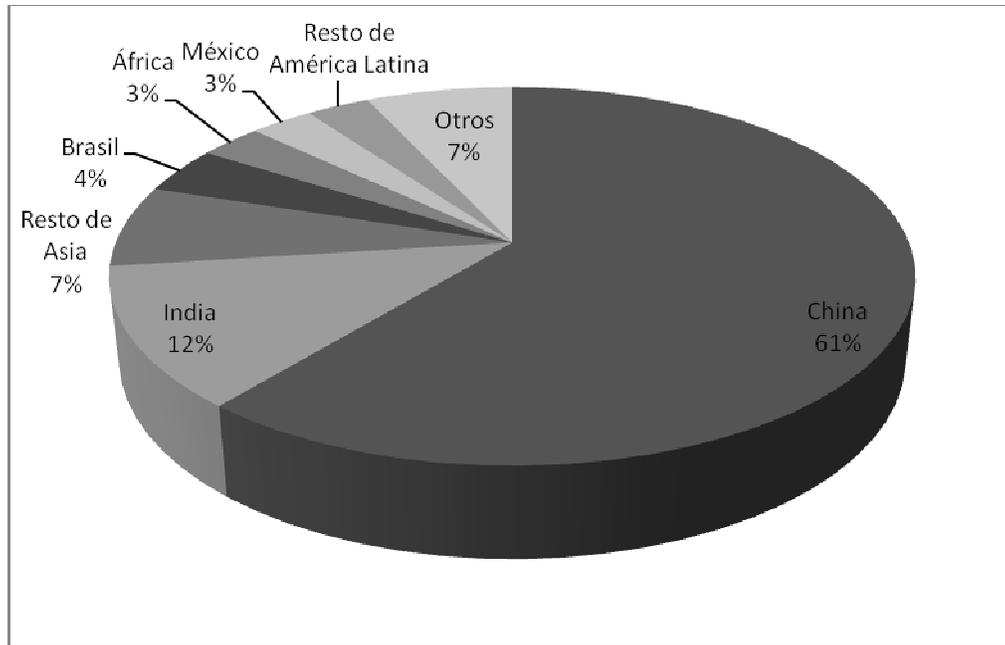


Figura 1.3. Principales países vendedores de bonos de carbono. Fuente: Anónimo, 2010c

La producción, la transformación y el consumo de energía pueden tener diversos impactos negativos en el entorno natural, como por ejemplo en el caso de los combustibles fósiles, el agotamiento de las reservas (depósitos de carbón, yacimientos petroleros y/o de gas natural) y las emisiones derivadas de la quema de los mismos son algunos de los temas.

Lo anterior hace necesario que se lleven a cabo acciones inmediatas para mejorar los servicios energéticos, identificando primordialmente la protección del medio ambiente. En este contexto, el desarrollo energéticamente sostenible contempla el estudio en áreas como: seguridad energética, mejoramiento de la eficiencia energética, uso de energías renovables, una sana política energética, investigación y desarrollo tecnológico, acceso a la energía, transporte, medio ambiente, salud y seguridad (Anónimo, 2000).

Tabla 1.2. Cartera actual de proyectos de mecanismos de desarrollo limpio, MDL, en México.

Fuente: Gallardo, 2005

TIPO DE PROYECTOS	NÚMERO DE PROYECTOS	REDUCCIONES ESTIMADAS DE CO ₂ Equivalentes (kT/a)
Minihidroeléctricas	6	263
Plantas eólicas	6	1626
Generación de desechos orgánicos	5	1394
Aprovechamiento de metano en rellenos sanitarios	7	600
Aprovechamiento o quema de metano (gas grisú) en minería	1	2000
Secuestro de carbono en subsuelo	1	2200
Transporte	1	200
Eficiencia energética y reingeniería de proceso	4	2100
Incineración de HFC-23 proveniente del proceso de manufactura de CFC	1	2712
Programa nacional para la modernización del autotransporte y de sustitución de motores eléctricos	2	127
TOTAL	34	11022

Para cumplir la demanda de energía, se contempla la producción de la misma a partir de combustibles fósiles en mayor proporción, como se observa en la Figura 1.4, donde la mayor demanda de energía primaria es generada por países que no son miembros de la Organización

para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE⁷ u OECD por sus siglas en inglés). Esto resulta en una dependencia de los recursos fósiles y una emisión de contaminantes a la atmósfera. Para reducir lo anterior, se podría diversificar el consumo de los combustibles ayudando a mejorar la seguridad energética; proponer normas de eficiencia energética para los procesos y las cadenas de producción, así como impulsar la investigación y el desarrollo para el mejoramiento del uso de la energía, a lo cual la presente tesis busca realizar una aportación.

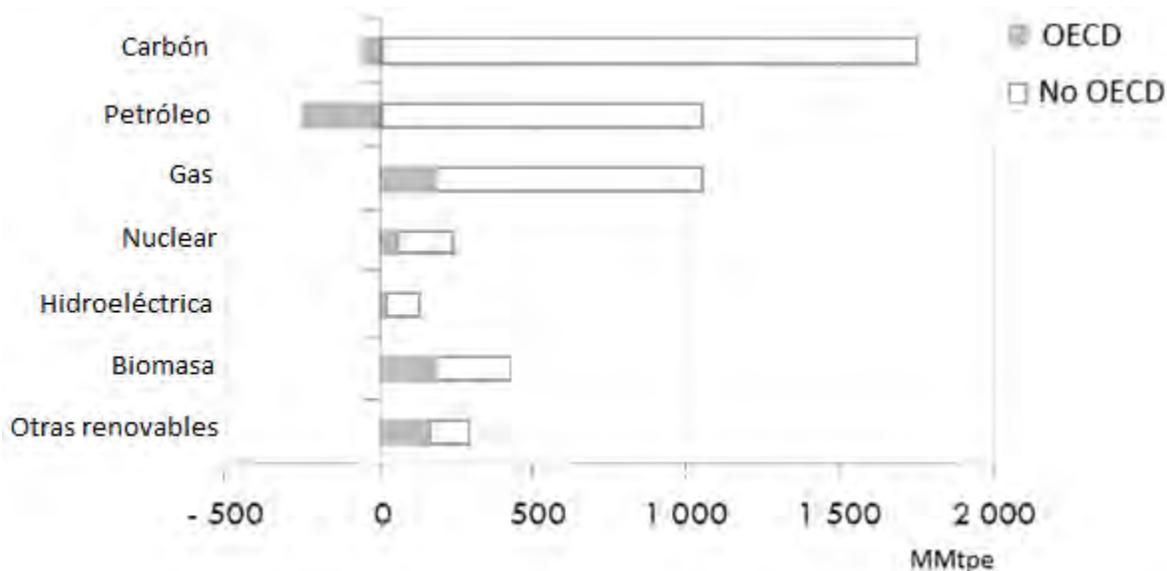


Figura 1.4. Demanda de energía primaria para el periodo 2007-2030 en millones de toneladas de energético equivalente al petróleo (MMtpe). Fuente: IEA, 2009

La Figura 1.4 se encuentra en unidades de millones de toneladas de energético equivalente al petróleo (MMtpe) e indica que entre 2007 y 2030, los combustibles fósiles representarán el 77% del incremento de la demanda de energía primaria en el mundo. Este reporte de la Agencia Internacional de Energía, IEA, por sus siglas en inglés, señala también que la demanda de petróleo aumentará de 85 millones de barriles por día, b/d, en 2008, a 88 millones en 2015 y 105 millones

⁷ Los países miembros a la OCDE son Canadá, Estados Unidos, Reino Unido, Dinamarca, Islandia, Noruega, Turquía, España, Portugal, Francia, Irlanda, Bélgica, Alemania, Grecia, Suecia, Suiza, Austria, Países Bajos, Luxemburgo, Italia, Japón, Finlandia, Australia, Nueva Zelanda, México, República Checa, Hungría, Polonia, Corea del Sur, Eslovaquia, Chile y Eslovenia.

en 2030. En este contexto, a China y a la India les corresponde el 93% del incremento de la demanda global en ese período (IEA, 2009).

En el caso de México, la producción de energía primaria ha estado orientada primordialmente a la producción de hidrocarburos, los cuales representan un 90%, en su mayor parte petróleo crudo y condensados (70%) y en menor medida gas natural con un 20%, como se muestra en la Figura 1.5.

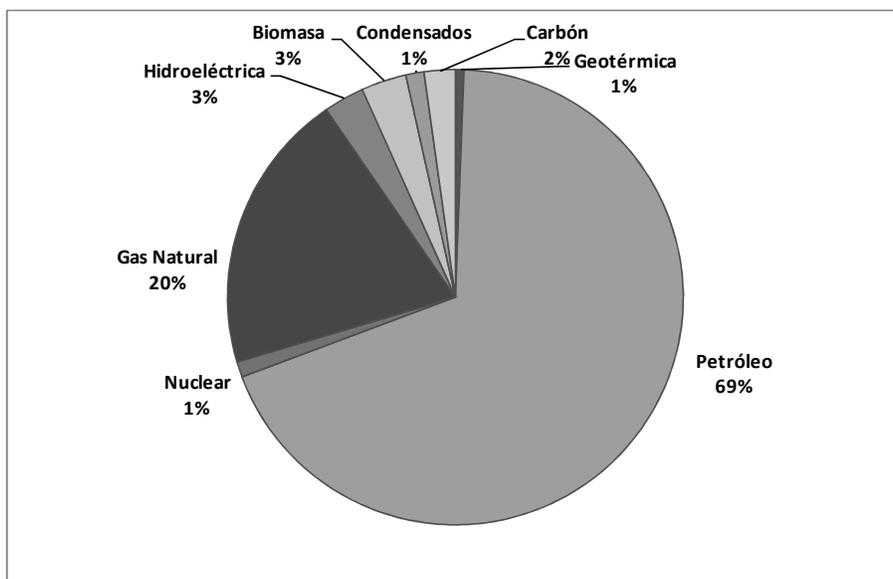


Figura 1.5. Producción de energía primaria en México. Fuente: *Elaboración propia con datos de Anónimo, 2007*

Entonces, es claro que al ser una nación dependiente de los recursos fósiles, se deben utilizar de manera sostenida, para así asegurar el abastecimiento energético, así como de aquellos productos que provienen de estos insumos, los cuales conforman una industria muy importante en México, la industria petroquímica y, por lo que esta tesis toma importancia, al analizar los tipos de polietileno y el polipropileno, los cuales provienen de recursos fósiles.

Para lograr una reducción en las emisiones contaminantes, la IEA reporta que la eficiencia energética será la fuente más importante para evitar mayor contaminación de CO₂ y ahorrar energía, en mayor proporción que las fuentes renovables de energía. Esto se puede observar de manera gráfica en la Figura 1.6, donde el “Escenario de referencia” es aquel en el que los

gobiernos no introducen cambio alguno en sus políticas actuales, mientras que en el “Escenario 450” se realizan diversas prácticas para limitar los GEI a 450 ppm de CO₂-equivalente. Por esto, la aplicación de una herramienta que considere la eficiencia en el uso de los recursos y de la energía, así como la calidad de la misma, como se propone en esta investigación, es una propuesta útil para lograr tales objetivos de reducción de emisiones.

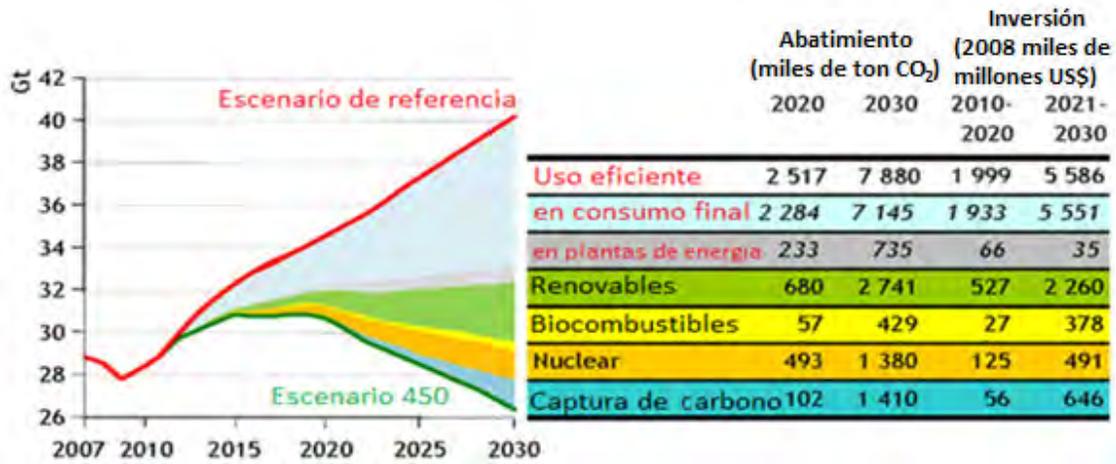


Figura 1.6. Abatimiento de emisiones de CO₂. Fuente: Anónimo, 2008c

En este gráfico se puede notar que las medidas de uso eficiente de energía resultarán en una aportación de dos tercios del objetivo propuesto de abatimiento de emisiones, mientras que las energías renovables contribuyen con aproximadamente un quinto.

Por su parte, la Secretaría de Energía (SENER), en su estrategia de Energía, indica que en línea con el “Eje Rector de Sustentabilidad Ambiental de la Estrategia”, el sector energético debe disminuir el impacto de sus operaciones sobre el medio ambiente, reduciendo los efectos derivados de las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, haciendo uso eficiente de los recursos naturales. Por ello es que uno de sus indicadores en cuanto al ámbito de sostenibilidad ambiental, proponen que se derive del ámbito de ahorro en el consumo final de energía, aunque esta meta no está debidamente cuantificada.

Tan solo en el año 2006, el consumo de energía por habitante fue de 77.2 PJ/h. Estas cifras indican la intensidad en el consumo energético de México y, para mejorar la eficiencia energética, el

gobierno federal emprende programas institucionales con el objeto de preservar los recursos energéticos no renovables, cuidar el medio ambiente, aumentar la competitividad de la economía y proteger el presupuesto familiar (*Villanueva-Moreno y Ferrando-Bravo, 2010*).

Igualmente, el llamado índice de intensidad energética muestra la cantidad de energía necesaria para producir un peso mexicano de producto interno bruto (PIB) en moneda constante del año 1993. Esta relación fue de 4,371 kJ/MXN (*Villanueva-Moreno y Ferrando-Bravo, 2010*).

1.8 La industria petroquímica en el papel del desarrollo sostenible

La industria química transforma las materias primas naturales de la tierra, el agua y el aire en productos de uso diario. Si no fuera por los productos petroquímicos no existirían las resinas especiales para la manufactura de computadoras, aditivos especiales para el terminado del papel, productos para el control de plagas, compuestos limpiadores, cosméticos, artículos de aseo, pinturas, ni productos para el tratamiento de aguas.

La industria química y petroquímica fabrican a nivel mundial más de 70,000 productos, desde una gran cantidad de metales, minerales, aceites vegetales, gas natural, grasas animales y otras materias primas.

La industria petroquímica (IPQ) tiene una función muy importante, ésta multiplica por varias veces el valor agregado, el valor del producto final y la ganancia, mucho mejor de lo que lo hace la sola exportación de petróleo; información conocida por las grandes empresas transnacionales que, desde el inicio del neoliberalismo en México en los años 80 del siglo XX, presionaron al gobierno mexicano a vender crudos y a importar petroquímicos.

La industria petroquímica mexicana debe ser vista como un sector clave que contribuirá a mejorar nuestro nivel de vida, sin necesidad de importar los bienes de consumo final que absolutamente todos demandamos y que provienen de la IPQ.

La IPQ es una extensa red formada por un gran número de cadenas entrelazadas que elabora compuestos demandados por la economía. Estas cadenas inician con los productos obtenidos de la refinación del petróleo y/o del procesamiento del gas natural asociado y no asociado. En esta red,

un mismo compuesto puede ser producido a través de diferentes cadenas, mediante procesos diferentes e incluso partiendo de distintos conjuntos de materias primas.

Para la mayoría de los productos, la ruta de producción parte del metano, etano y etileno; propano y propileno, butano, pentanos y los aromáticos. A todos ellos se les llama productos petroquímicos “básicos” y son considerados las piedras angulares de la petroquímica.

Actualmente, la industria petroquímica mexicana, como resultado del neoliberalismo, ha sufrido una considerable merma en la producción de importantes productos necesarios para la economía, habiendo aumentado las importaciones, sobre todo de productos de la demanda final (pertenecientes ya a la industria manufacturera), por no existir los insumos básicos para fabricarlos en México.

La IPQ está presente en los automóviles, textiles, electrónica, plásticos, cosméticos, ropa, calzado, etc. Además, cabe mencionar que esta industria tiene un gran efecto multiplicador del empleo ya que por cada empleo en la petroquímica intermedia se generan 8 en la final y 14 en la industria manufacturera (*Escobar-Toledo y Puente-Moreno, 2009*).

Para la IPQ, el desarrollo tecnológico es primordial, ya que continuamente surgen nuevos procesos que pueden modificar la rentabilidad de las plantas ya existentes, la viabilidad de proyectos futuros y alterar la estructura de las cadenas. Es un hecho que la IPQ requiere del uso intensivo de capital. El monto de la inversión requerida para construir una planta petroquímica puede equivaler al valor de la producción total de la planta durante dos o tres años o incluso más. Esto, aunado a las variaciones y ciclos de la oferta, la demanda y los precios de las materias primas y productos involucrados hace importante que se evalúe el funcionamiento de la estructura de la IPQ actual.

1.9 Residuos sólidos

Dado el desarrollo económico e industrial, en nuestro país se produce maquinaria, bienes de inversión y de consumo y, como consecuencia de estos procesos, se generan residuos y desechos que en conjunto producen contaminación ambiental.

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2003), se le denomina residuo al material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final (Aguilar-Cruz y Contreras-Durán, 2008).

Los residuos pueden ser clasificados en “Residuos de Manejo Especial”, “Residuos Incompatibles” y “Residuos Sólidos Urbanos”.

Los “Residuos de Manejo Especial” son aquellos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos (Aguilar-Cruz y Contreras-Durán, 2008).

Los “Residuos Incompatibles” son aquellos que al entrar en contacto o al ser mezclados con agua u otros materiales, reaccionan produciendo calor, presión, fuego o gases (Aguilar-Cruz y Contreras-Durán, 2008).

Los “Residuos Peligrosos” son aquellos que poseen alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o agentes biológico-infecciosos, CRETIB, que les confieran peligrosidad; así como los envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados por ellos (Aguilar-Cruz y Contreras-Durán, 2008).

Los “Residuos Sólidos Urbanos” (RSU, anteriormente llamados “Residuos Sólidos Municipales”), son los generados en las casas habitación. Resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas, de los productos que se consumen y de sus envases, embalajes y empaques. Así como también los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública, que genere residuos con características domiciliarias, siempre que no sean considerados como residuos de otra índole.

En la Tabla 1.3 se presenta la composición de la basura en México, en el año 2000, donde se nota que los plásticos constituyen el 11% (Frías et al., 2003). Estos y otros materiales como el papel, son susceptibles de recuperación para ingresar nuevamente a una cadena productiva, de tal forma que no representen un problema ni un riesgo a la población y al ambiente.

Tabla 1.3. Composición de la basura en México. Fuente: Frías et al., 2003

Componente	%
Desechos orgánicos	47
Papel	14
Otros	14
Plásticos	11
Materiales peligrosos	10
Metales	2
Vidrio	2

El consumo aparente de plásticos en México fue de 29 kg/habitante y, para el año 2005, fue de 49 kg/habitante. Los residuos plásticos al año son de alrededor de 1,121,000 toneladas (Frías et al., 2003). Para el año 2005 se generaron 35,383 mil toneladas de RSU (Aguilar-Cruz y Contreras-Durán, 2008). El estado con la mayor cantidad de residuos sólidos generados en ese año fue el estado de México, con una participación de 5,902 miles de toneladas, que corresponden al 16.7%, mientras que el Distrito Federal ocupa la segunda posición con 4,550 miles de toneladas, lo que equivale a 12.9%. La Figura 1.7 muestra la generación de residuos sólidos en México per cápita por entidad federativa.

En general, los desperdicios de plásticos están básicamente formados por: polietileno de baja densidad (PEBD), polietileno de alta densidad (PEAD), policloruro de vinilo (PVC), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y polietilentereftalato (PET).

Las envolturas plásticas son ciertamente un componente muy visible y duradero de los tiraderos. Por ello, las envolturas degradables pueden ser de gran ayuda para reducir el problema en los rellenos sanitarios. Como resultado, se han impuesto legislaciones para el desarrollo del plástico, principalmente en algunos países de Europa y en los Estados Unidos, lo cual a su vez ha propiciado el desarrollo de tecnologías para mejorar la fabricación de plásticos degradables.

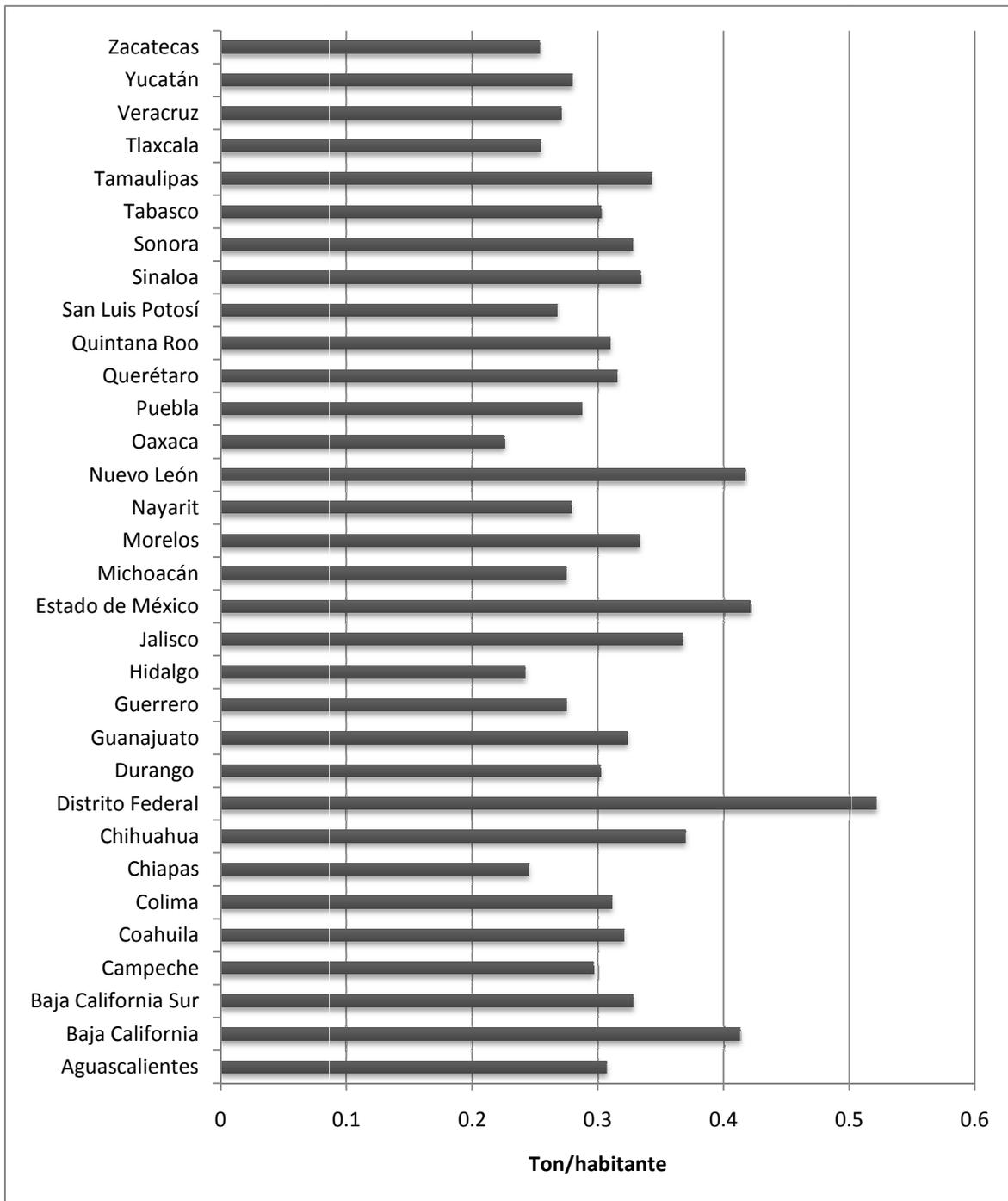


Figura 1.7. Generación de residuos sólidos urbanos por entidad federativa per cápita en el 2005.

Fuente: *Elaboración propia con datos de Aguilar-Cruz y Contreras-Durán (2008) y Anónimo (2010a)*

Los resultados obtenidos actualmente se basan en la adición de ciertas sustancias al plástico que provoquen su desintegración.

En el caso de México, el 18 de agosto de 2009, el Gobierno del Distrito Federal publicó el decreto por el cual se modifican algunos artículos de la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (*GDF, 2009*).

Como se mencionó en la introducción, los comercios no podrán entregar a título gratuito bolsas de plástico. Sin embargo, se establece que los centros comerciales podrán entregar gratuitamente bolsas de plástico, únicamente en aquellos casos que por cuestiones de asepsia o de conservación de alimentos, no resulte factible el uso de tecnología biodegradable como sustituto. El uso de bolsas de plástico será factible siempre que éstas cumplan con las características de biodegradabilidad establecidas (*GDF, 2009*).

Lo anterior ocasionó que los comercios cobraran la bolsa al precio que cada uno de ellos decidiera, sin haber uniformidad o acuerdo en cuanto al precio que este producto debería tener en los comercios. Esta acción sólo ha sido aplicada en el Distrito Federal. Dependiendo de los resultados se planteará la aplicación de una legislación similar en otros estados de la República.

1.9.1 Opciones para el manejo de los residuos sólidos urbanos

Los residuos deben ser manejados, tratados y finalmente depositados en algún lugar adecuado para su disposición final. Existen diferentes opciones para el adecuado manejo de estos, entre otras:

- **Relleno sanitario:** es un lugar legalmente utilizado donde se deposita la basura municipal después de la clasificación o selección. Se clasifican en mecánicos y rústicos: en ambas variantes los residuos se distribuyen en 20 a 30 cm de espesor y se compactan formando una celda que deberá recubrirse con una capa de tierra entre 15 y 20 cm, esparcida y compactada igual que los residuos.

- **Compactación:** este método reduce el volumen que ocupan los residuos, con la aplicación de altas presiones ejercidas sobre ellos. Este sistema no ha dado resultado porque se ha observado

que estructuralmente falla la compresión y que con el tiempo la degradación de los materiales rompe el mismo tabique.

•**Incineración:** esta técnica consiste en eliminar la mayor parte del volumen de los residuos mediante su combustión, a través de la cual se transforman los desechos en gases, cenizas y escoria, con el fin de reducir el volumen y aprovechar la energía producida en ésta.

•**Reciclado:** El reciclaje es un proceso fisicoquímico o mecánico que consiste en someter a una materia o un producto ya utilizado a un ciclo de tratamiento total o parcial para obtener una materia prima o un nuevo producto. También se podría definir como la obtención de materias primas a partir de desechos, introduciéndolos de nuevo en el ciclo de vida.

•**Tratamientos biológico-químicos:** se desarrollan principalmente a bajas temperaturas y bajas velocidades de reacción; en la alimentación se aceptan altos niveles de humedad pero requieren de material biodegradable, algunos de estos procesos involucran síntesis de productos químicos en varias etapas. Los subproductos que se obtienen de estos procesos son biogás y abonos.

•**Tratamientos físicos:** se usan principalmente para el acondicionamiento de los RSU, para después ser enviados a otro tratamiento; incluyen la separación o secado de los desperdicios, para facilitar el proceso. El material resultante es un combustible derivado del residuo y puede ser densificado hasta formar “pelets”, a este grupo pertenece la digestión o degradación anaerobia.

1.10 Análisis de ciclo de vida y desarrollo sostenible

Uno de los mayores retos que enfrenta el desarrollo sostenible es diseñar marcos operativos que permitan evaluar de manera tangible la sostenibilidad de un proyecto o tecnología, dicho de otra forma, asignarles un valor a estas acciones, más allá del término económico. Como una solución a este problema se presentan las herramientas de gestión ambiental, entre las que se encuentra el “Análisis de Ciclo de Vida”, ACV.

El objetivo principal del análisis de ciclo de vida es el de cuantificar los impactos ambientales potenciales de los productos, a lo largo de su ciclo de vida (producción, consumo y disposición final).

Este enfoque permite una comparación entre diferentes productos que estén destinados a cumplir la misma función, analizando las cargas ambientales generadas por cada uno de ellos.

Los productos pueden ser inofensivos durante su utilización, pero para su fabricación o posterior desecho, puede estar presente la emisión de agentes tóxicos para el medio ambiente.

El ACV es una herramienta cuantitativa, los resultados, así como la información requerida para que se lleve a cabo este análisis, están basados en investigación y reportes científicos. Las aplicaciones de este análisis son diversas, se pueden analizar productos de cualquier índole para compararlos con otros similares o bien se puede aplicar un ACV para diseñar un producto ambientalmente *amigable* (Udo de Haes y Reinout, 2007). Esta herramienta se describirá más adelante en el Capítulo III.

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DE EXERGÍA: CONCEPTOS Y MÉTODO DE ANÁLISIS

Este capítulo explica el concepto de exergía, así como su importancia en la conservación y el uso eficiente de la energía. Se empieza por introducir las bases termodinámicas con las que se llega a su enunciación, posteriormente se presentan las ecuaciones básicas que la definen. También se describe cómo se debe llevar a cabo un análisis de exergía y se presentan las principales aplicaciones del mismo. Por último se menciona su relación con el desarrollo sostenible.

2.1 Introducción

La capacidad de los recursos naturales para permitir la realización de procesos térmicos, químicos y biológicos se debe a la desviación de su estado y de su composición con respecto al estado y la composición del entorno. Por ello, la medida del máximo trabajo que se puede obtener bajo condiciones ambientales, puede ser aceptada como una medida para la evaluación de los recursos naturales. Esta cantidad ha sido nombrada exergía (*Szargut, 2005*).

El análisis de exergía es una herramienta útil que permite conocer el grado en que se desperdicia la energía. Todo esto se hace con el objetivo de identificar aquellos puntos susceptibles a modificaciones en el logro de un aumento en la producción al mismo tiempo que se disminuyen las pérdidas de energía. Esta técnica se utiliza para evaluar el funcionamiento de cadenas de producción, procesos y equipos industriales y está basada en la aplicación simultánea de las dos leyes fundamentales de la termodinámica (conservación de la energía y degradación de la misma).

Antes de comenzar a definir lo que es la exergía y el método para su análisis, se presentan de manera breve los conceptos termodinámicos que dan sustento a dicha definición.

2.2 Estado del arte del concepto de exergía

Los orígenes de la exergía se encuentran primero en su base, la formulación de la segunda ley de la termodinámica, que sucedió gracias al trabajo de Carnot y de Clausius (*García-Aranda, 2003*).

Posteriormente, las primeras contribuciones del análisis exergético se encuentran en los trabajos realizados por G. Gouy, A. Stodola, J.W.Gibbs y F. Bosnjakovic (*Santoyo-Hernández, 2006*).

En 1875, en un trabajo titulado "On the equilibrium of heterogeneous substances", Gibbs expuso los fundamentos teóricos del concepto de exergía, en donde le llama "Available Energy of The Body and Medium" (energía disponible del cuerpo y del medio). Gibbs también introdujo el concepto del máximo trabajo de las reacciones químicas, conocido como energía de Gibbs (ΔG) o energía libre o energía libre de Gibbs (*Santoyo-Hernández, 2006*).

Tiempo después, el francés G. Gouy y el alemán A. Stodola formularon de manera independiente una ley que determina la pérdida de la capacidad de producir trabajo debido a la irreversibilidad

termodinámica (*DeBaufre, 1925*). Esta ley no causó mucho interés en un principio. Las primeras publicaciones basadas en esta ley fueron hechas por Jouget (*1907*), Darrieus (*1930*) y Keenan (*1932*).

Gouy propuso, en 1889, el empleo de una nueva función termodinámica para generalizar el hecho de que solamente una fracción de energía térmica puede ser convertirse en energía mecánica, a la cual llamó "Energie Utilisable" (energía utilizable) (*Szargut, 2005*).

Nueve años después, en 1898, Stodola utilizó el término "freie technische Energie" para referirse a la capacidad de realizar trabajo (*Szargut, 2005*).

Los términos continuaron surgiendo, por ejemplo, E. Bosnjakovic analizó el impacto de las irreversibilidades y propagó la idea de contrarrestarlas. En 1935, en Alemania publicó un trabajo de termodinámica, donde propone la aplicación práctica del análisis de la segunda ley de la termodinámica, manejando el concepto de "Technische Arbeitsfähigkeit" (Capacidad de trabajo técnico) (*Fratzscher, 2002*). Por su parte el norteamericano Keenan introdujo el concepto de *disponibilidad* (*Keenan, 1948*).

Posteriormente, en 1953, el alemán E. Schmidt se refiere a la exergía como "Technische Maximale Arbeit" (trabajo técnico máximo) (*Rivero et al., 1990*).

En 1955, el francés Gibert nombra a la exergía como "Energie non Degradée en Chaleur" (energía no degradada a calor) y propone su aplicación en estudios para el ahorro de energía en procesos industriales (*Rivero et al., 1990*).

Es a mediados de la década de los cincuenta del siglo XX cuando se proponen términos para ser aceptados mundialmente; así, en 1945 el alemán U. Grigull propone la palabra "Ekthalpie" (Ectalpía = rendimiento calórico), pero en 1956 es debatida por el yugoslavo Z. Rant, que considera que la capacidad de trabajo no es "Thalpie" (calor) ni "Ekthalpie", sino la obtención auténtica de trabajo. Rant presenta la palabra "Exergie" (Exergía = trabajo que puede ser extraído), fundamentando su estructuración en su significado etimológico.

Durante el periodo de 1960-1970, el análisis de exergía fue desarrollado principalmente en Europa, pero después de 1980 el interés en este análisis se incrementó de manera considerable en América.

A principios de la década de los sesenta fueron establecidos los fundamentos del “Método de Exergía”, como un desarrollo integrado de los principios de la termodinámica a sistemas industriales reales. Los primeros en este desarrollo fueron: Bosnjakovic, Trepp, Bachr, Brodyanskii y Tribus (*Rivero et al., 1990*).

El desarrollo del análisis de exergía, aplicado a la economía (termoeconomía), fue iniciado en los Estados Unidos por M. Tribus y R. B. Evans (1962, 1966) en la Universidad de California, Los Ángeles, y por E. F. Obert y R. A. Gaggioli (1961, 1963) en la Universidad de Wisconsin, Madison (*Rivero et al., 1990*).

Hoy en día, la bibliografía sobre el tema es extensa. Algunos autores de libros monográficos que tratan este concepto son: R. Petela; I. Nerescu y V. Radcenko; W. Fratzscher y K. Michalek; D.R. Morris y F. Steward (*Szargut, 2005*).

En cuanto a los trabajos más importantes de los últimos años, se encuentran los realizados por J. Szargut, quien ha publicado diversos libros y artículos sobre el análisis de exergía y sus aplicaciones; T.J. Kotas con su libro: El método de exergía en el análisis de plantas térmicas; Sorin y P. Le Goff, con estudios exergéticos en procesos de destilación y bombas de calor; el norteamericano Moran, quien publicó diversos libros sobre termodinámica y el análisis de disponibilidad (*Santos-Sánchez, 2007*).

El establecimiento de una relación de eficiencia exergética fue abordado por Jouget y Darrieus. Posteriormente, esto fue analizado por Grassman y Nesselmann. Años más tarde Cornelissen (1997) abordó este tema de manera amplia (*García-Aranda, 2003*).

Además de lo anterior, Grassman también desarrolló una manera gráfica de representar un balance de exergía en un sistema (*Grassman, 1959*).

Por su parte, Tsatsaronis presenta las publicaciones más importantes en el área de termoeconomía realizadas durante el periodo de 1970 a 1986 (*Santos-Sánchez, 2007*).

El sueco Göran Wall utiliza la exergía y la propone como un indicador de sostenibilidad y analiza desde esta perspectiva la exergía de las sociedades (*Wall y Gong, 2001*).

Dewulf y Van Langenhove evalúan la sostenibilidad del proceso de tratamiento de residuos, así como del ciclo de vida de algunos plásticos (*Dewulf y Van Langenhove, 2004*). Por su parte, Enrico Sciubba ha desarrollado también análisis de ciclo de vida exergético (*Sciubba, 2003*).

Por su parte, el mexicano Rivero[‡] realizó análisis de exergía y exergoeconómicos aplicados a la industria petroquímica y los procesos de refinación del petróleo (*Santoyo-Hernández, 2006*).

Una lista no exhaustiva, sin embargo, útil y completa, de artículos sobre el tema, publicados en el periodo 1995 – 2002, se puede encontrar en el trabajo realizado por García-Aranda (*2003*).

A continuación, se muestra un breve análisis bibliométrico realizado para las publicaciones del tema de exergía o análisis de segunda ley. La Figura 2.1 muestra la intensidad en el número de publicaciones de acuerdo a cada país, esto durante el periodo 1969-2009.

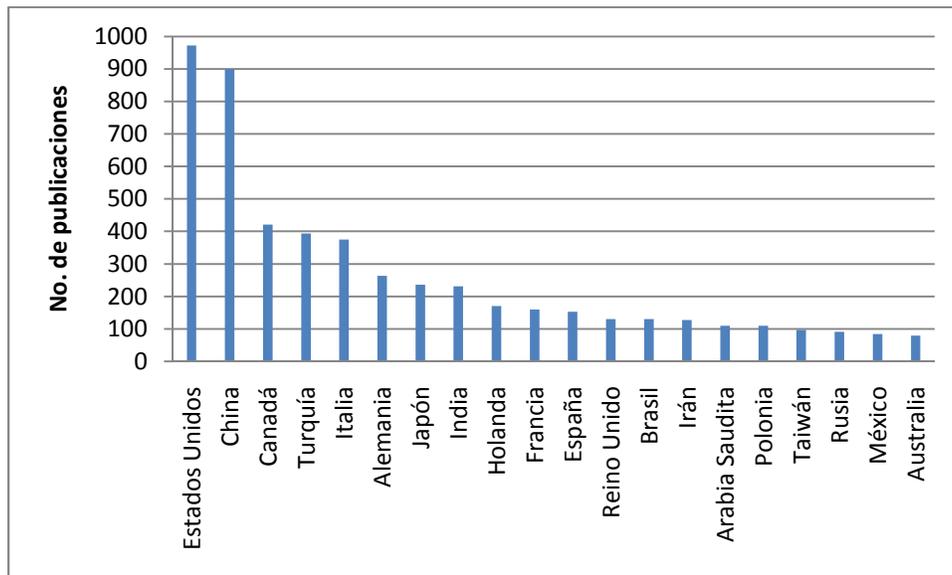


Figura 2.1. Número de publicaciones por país. Fuente: elaboración propia

Se puede ver que México se encuentra en el lugar 19, contando con un total de 84 publicaciones.

Por su parte, la Figura 2.2 presenta el comportamiento de la intensidad de publicación para los últimos 20 años, que comprenden el periodo de 1990-2009.

2.3 Primera y Segunda Leyes de la Termodinámica. Fuente: (Smith et al., 1991)

La termodinámica estudia las transformaciones de energía y la interacción de ésta con la materia. Las condiciones generales bajo las que se observan todas estas transformaciones se conocen como la primera y la segunda leyes de la termodinámica.

La primera ley es conocida también como el principio de conservación de la energía. Establece que la energía, mediante interacciones puede cambiar de una forma a otra pero la cantidad de energía permanece constante, en otras palabras: *“la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma”*. Esta ley establece que existe una función de estado llamada energía interna (U), tal que un cambio en su valor es dado por un sistema en movimiento por la diferencia entre el calentamiento (Q) y el trabajo (W) hecho por el sistema durante un cambio de estado. La ecuación general es:

$$\Delta U = Q - W \quad (2.1)$$

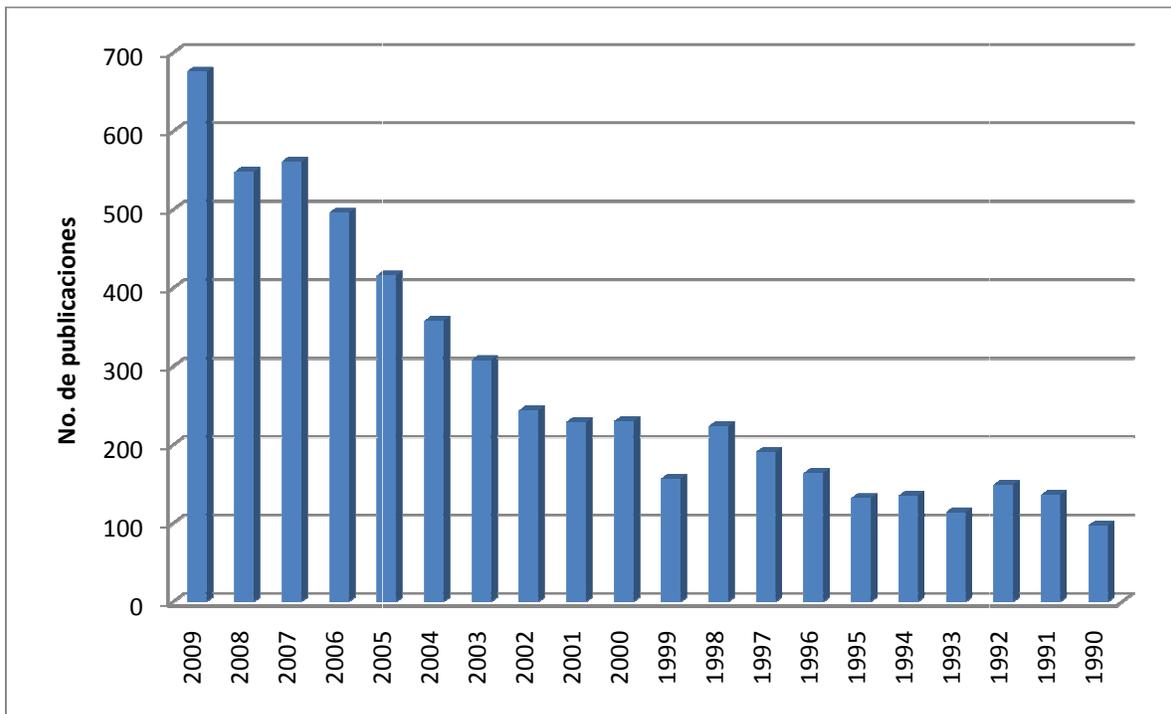


Figura 2.2. Intensidad de publicaciones respecto al tiempo. Fuente: elaboración propia

Sin embargo, esta ley no proporciona información acerca de la dirección en la que ocurren los procesos espontáneos, o bien, sobre los aspectos de reversibilidad o irreversibilidad⁸ de los procesos termodinámicos.

Por su parte, la segunda ley establece la dirección en la que se llevan a cabo los procesos termodinámicos y, por lo tanto, la imposibilidad de que ocurran en el sentido contrario. De esta forma, la segunda ley impone restricciones para las transferencias de energía que hipotéticamente pudieran llevarse a cabo teniendo en cuenta sólo la primera ley.

La segunda ley de la termodinámica enuncia que así como la energía contiene cantidad también posee calidad, y los procesos ocurren en la dirección de la disminución de la calidad de la energía. Calidad de la energía es sinónimo de la capacidad para causar un cambio. Existen varios enunciados para esta ley. Entre ellos, el enunciado de Clausius establece que:

"Es imposible para un sistema transferir calor de un cuerpo de baja temperatura a uno de mayor temperatura. Simplemente, la transferencia de calor sólo puede ocurrir de manera espontánea en dirección de una disminución de temperatura" (Smith et al.). Por ejemplo, no es posible construir un refrigerador que opere sin proporcionarle trabajo.

Los esfuerzos para cuantificar la calidad de la energía o el trabajo potencial resultaron en la definición de las propiedades entropía y exergía. La entropía (S) se define como un estado energético azaroso que no se encuentra disponible para su directa transformación en trabajo.

Para un sistema aislado (que no intercambia materia ni energía con su entorno), la variación de la entropía siempre debe ser mayor que cero.

$$(\Delta S)_{\text{aislado}} \geq 0 \quad (2.2)$$

donde el signo de igualdad corresponde al caso ideal de un proceso reversible.

⁸ Un proceso reversible es aquel que puede regresar a su estado inicial, a través de infinitos estados de equilibrio, sin pérdida o disipación de la energía. Los procesos reales son irreversibles.

Todos los procesos espontáneos, se llevan a cabo de manera que la entropía se maximiza, haciendo así que la energía se encuentre en menor disponibilidad (*Dincer y Cengel, 2001*). En el estado de equilibrio la entropía alcanza un valor máximo.

La importancia de estas leyes para esta tesis es la relación que proveen entre la entropía y la energía utilizable. La energía es más útil cuando puede hacerse que fluya de una sustancia a otra, por ejemplo, para calentar una casa o para obtener trabajo mecánico. De acuerdo entonces con la segunda ley de la termodinámica, la energía utilizable debe tener una entropía baja.

2.4 Definición de exergía

La palabra exergía viene del griego ex y ergon y significan desprendimiento y trabajo. El término exergía fue propuesto por Rant en 1956, pero el concepto se fue desarrollando en trabajos previos como los hechos por J.W. Gibbs, G. Gouy, A. Stodola y F. Bosnjakovic (*Szargut, 2005*).

La exergía se define como el máximo trabajo que se puede obtener de un material, o una cantidad dada de energía con respecto a un ambiente de referencia, como resultado de su condición de no equilibrio.

Las unidades de la exergía son las mismas unidades que se utilizan para la energía, tales como: cal, J, BTU, etc. Sin embargo, han surgido propuestas para que haya unidades especiales para diferenciar la exergía, como el Aeu (American exergy unit) o bien, agregar una letra e al final de la unidad energética (por ejemplo: cale, Je, BTUe) a fin de especificarla como una unidad exérgica (*Santos-Sánchez, 2007*).

La exergía se emplea para expresar la cantidad de energía disponible, su habilidad para ser convertida en otros tipos de energía y, sobre todo, determinar la capacidad de realizar trabajo en un sistema dado de portadores de energía en el ambiente normal de la Tierra.

Szargut y colaboradores (*1988*) definen la exergía como la cantidad máxima de trabajo obtenible cuando un portador de energía es llevado de su estado inicial a un estado de equilibrio termodinámico (estado inerte) con las sustancias comunes del ambiente natural por medio de

procesos reversibles, involucrando interacciones sólo con las antes mencionadas sustancias de la naturaleza.

El estado muerto o estado inerte de referencia es el estado en el cual un sistema se encuentra en equilibrio con su entorno y, por lo tanto, el sistema no es capaz de producir trabajo alguno. En este estado el sistema posee energía; sin embargo, el valor de su exergía es de cero.

En otras palabras, exergía es la cantidad máxima de trabajo que puede obtenerse si una sustancia o forma de energía es convertida a su estado inerte de referencia.

La exergía, por lo tanto, puede ser también la cantidad mínima de trabajo que debe ser suministrado si una sustancia o forma de energía tiene que ser producida a partir de su estado inerte de referencia. La exergía surge de la interacción entre los componentes del sistema y las sustancias de referencia en el ambiente.

Para calcular la exergía es necesario definir un estado de referencia, el cual está dado por las condiciones ambiente de presión y temperatura en las que se encuentra el sistema. Lo anterior quiere decir que la exergía de un sistema varía de un lugar a otro con diferentes condiciones ambientales. En esta tesis se utilizan las condiciones definidas por Szargut (*Szargut et al., 1988*), correspondientes a 1 atm y a una temperatura de 298.15K.

En contraste con la energía que siempre se conserva de acuerdo con la primera ley de la termodinámica, la exergía no cumple la ley de la conservación. La pérdida de exergía se conoce como irreversibilidad, la cual debe minimizarse para obtener un desarrollo sostenible. Una pérdida de exergía en un proceso significa un decremento en la eficiencia de la energía.

Por otro lado, cualquier cambio espontáneo en las sustancias que ocurre en el ambiente se lleva a cabo con un decremento de exergía: ésta es la ley de decremento de exergía en procesos espontáneos (*Sato, 2004*).

La exergía se reduce en procesos que involucran un cambio de temperatura, estrangulamiento, difusión, etcétera. También se pierde debido a la fricción, la combustión, así como otras reacciones químicas (*Szargut, 2005*).

La irreversibilidad o pérdida de exergía, durante el ciclo de vida completo permite evaluar el grado de perfección termodinámica de los procesos de producción, lo cual conduciría al análisis de las rutas de producción con mejor desempeño termodinámico y con menos daño al ambiente que conduzcan a la manufactura de bienes y/o servicios de la demanda final (*Escobar-Toledo, 1991*).

2.5 Disponibilidad termodinámica. Fuente: (Sophos, 1981)

El trabajo combinado que se obtiene cuando se alcanzan simultáneamente el equilibrio térmico y mecánico con el medio ambiente se conoce como disponibilidad y se designa con la letra b .

El tamaño del medio ambiente es tan grande que al efectuarse la transferencia de energía entre éste y la corriente de proceso, dicha transferencia se lleva a cabo a las condiciones ambientales, ya que sus propiedades intensivas se mantendrán constantes.

Para calcular la disponibilidad, el cambio mediante el cual la corriente de proceso se lleve a las condiciones de temperatura y presión del medio ambiente (T_0 y P_0), debe ser reversible.

Cuando se alcanza el equilibrio físico de la corriente de proceso con el medio ambiente se tiene una disponibilidad de $b=0$. Sin embargo, aún es posible extraer trabajo del sistema. Esto se logra haciendo reaccionar a la corriente de proceso con el medio ambiente hasta alcanzar el equilibrio químico.

2.6 Tipos de exergía

La exergía tiene dos formas de manifestarse, una asociada a una corriente de materia (función de estado) y la otra sin asociarla a una corriente de materia, sino a la energía en tránsito (función de transferencia). Esta última corresponde a la exergía del trabajo Ex_w y la exergía del calor Ex_h .

La exergía del trabajo es equivalente al mismo:

$$Ex_w = W \quad (2.3)$$

Por su parte, la exergía del calor es igual a la cantidad máxima de trabajo que puede obtenerse a partir de una cantidad de calor Q mediante una máquina reversible operando entre una fuente de calor a una temperatura T constante y un depósito de calor a una temperatura T_0 constante (García-Aranda, 2003), matemáticamente equivale a:

$$Ex_h = Q\theta = Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (2.4)$$

El término θ se conoce como el factor de Carnot.

En cuanto a la exergía de la materia, se compone por la exergía potencial, la cinética y la sustancial. Convencionalmente, la exergía de una sustancia se clasifica en dos: la exergía física, asociada con cambios de temperatura (exergía térmica), cambios en presión (exergía mecánica) y cambios en concentración y la exergía química asociada a cambios en la composición química de las sustancias (Sato, 2004), como se muestra en la Figura 2.3.

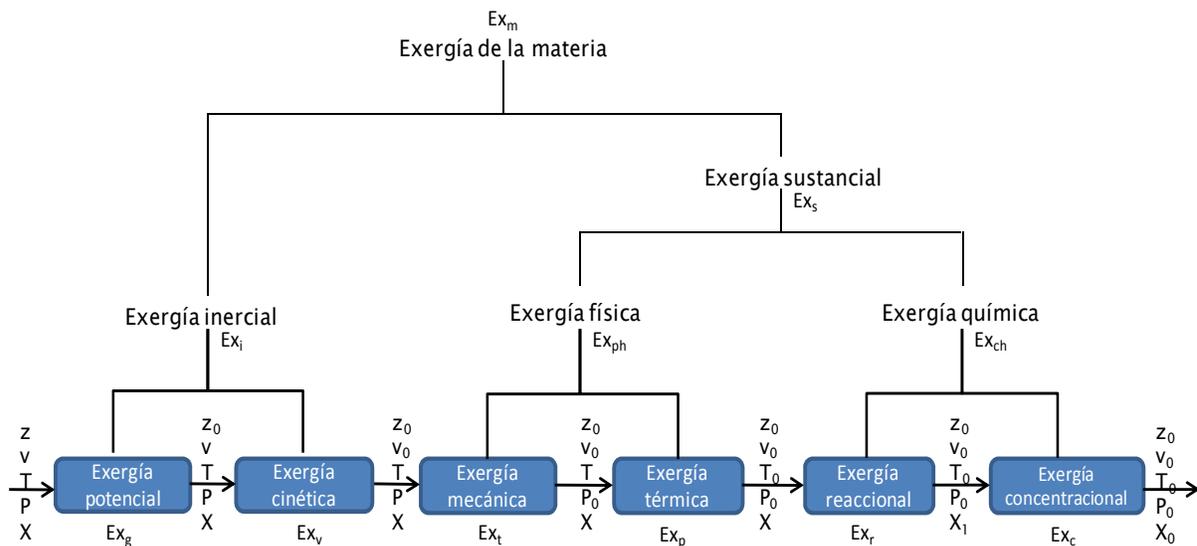


Figura 2.3. Exergía sustancial. Fuente: Rivero, 2010

2.6.1 Exergía física

La exergía física se define como el contenido de exergía de una sustancia, llevándola a través de un proceso reversible desde su estado inicial a temperatura T y presión P al estado determinado por la temperatura T_0 y la presión P_0 del entorno, sin ningún cambio en su composición química. Puede calcularse con:

$$Ex_{ph} = \Delta H - T_0 \Delta S = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (2.5)$$

donde:

H, S = Entalpía y Entropía evaluadas a la condición de no equilibrio, a composición constante

H_0 y S_0 = Entalpía y Entropía evaluadas a la condición de referencia, a composición constante

T_0 = Temperatura de la condición de referencia

2.6.2 Exergía química

La exergía química está dada por la energía liberada al reaccionar los componentes o al cambiar la concentración de los componentes, a temperatura y presión constante, T_0 y P_0 . Su valor se deriva de la diferencia que existe entre la composición de esta sustancia en relación con los componentes del ambiente.

Para conocer la exergía química, Szargut y colaboradores (1988) sugieren que se determine la exergía química en condiciones normales de presión y temperatura ($T = 298.15$ K, $P = 1$ atm), tomando en cuenta la concentración promedio de las especies de referencia en el medio ambiente y que ésta sea considerada como exergía química estándar.

Existen modelos propuestos por J. Ahrendts (1977), H.D. Baehr y E. F. Schmidt (1963), F. Bosnjakovic (1938), R.A. Gaggioli y P.J. Petit (1977), L. Rodríguez (1980), J. Szargut (1980) y J.H. Shieh y L. T. Fan (1982) que sugieren un estado de referencia para los compuestos presentes en el ambiente, para así calcular la exergía química, en especial de los elementos. Estos modelos proporcionan la exergía química estándar de las sustancias de referencia, que son aquellas contenidas comúnmente en el ambiente a condiciones estándar.

Para el cálculo de la exergía química de gases de referencia, los que en conjunto forman la atmósfera, debe determinarse el trabajo por tener a los componentes a la presión estándar desde la presión parcial del estado de referencia. Esto puede efectuarse por:

$$Ex_{ch} = RT_0 \ln P_0 / P_\infty \quad (2.6)$$

donde P_∞ es la presión parcial del componente en el estado de referencia.

A manera ilustrativa se presenta a continuación, un sencillo ejemplo de cálculo de exergía. Se requiere calcular la Ex_{ph} de una corriente de aire que se encuentra a una presión de 3 bar y una temperatura de 400K, tomando un estado de referencia de $P_0 = 1$ bar, $T_0 = 290$ K. Se utilizará la ecuación 2.5, considerando el aire como gas ideal y suponiendo una capacidad calorífica constante (C_p) de 1.005, se obtiene:

$$Ex_{ph} = C_p \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) + RT_0 \ln \frac{P}{P_0}$$

$$Ex_{ph} = 1.005 \left(400 - 290 - 290 \ln \frac{400}{290} \right) + 0.287 * 290 \ln \frac{3}{1}$$

$$Ex_{ph} = 108.26 \frac{kJ}{kmol}$$

2.7 Comparación entre energía y exergía

La Tabla 2.1 se presenta como una comparación entre las características de la energía y la exergía.

2.8 Pérdidas de exergía

Las pérdidas de exergía se pueden clasificar en internas y en externas. Las internas se refieren a aquéllas que suceden debido al proceso. Se calculan fácilmente con la ecuación de Gouy-Stodola (*Szargut, 2005*), que se presenta más adelante y se les conoce como irreversibilidades. Por su parte, las pérdidas externas de exergía se deben a la descarga de efluentes al ambiente.

Tabla 2.1. Comparación entre energía y exergía. Fuente: Szargut, 1980

ENERGÍA	EXERGÍA
Depende sólo de los parámetros del flujo de masa y energía y es independiente de los parámetros del entorno	Depende de los parámetros de flujo de materia y de energía así como de los del entorno
Su valor es diferente a cero ($E=mc^2$, la teoría de la relatividad indica que la masa conlleva una cierta cantidad de energía aunque se encuentre en reposo)	Es igual a cero en el estado inerte, en equilibrio con el ambiente
Se rige por la primera ley de la termodinámica en todos los procesos	Se rige por la primera ley de la termodinámica sólo en procesos reversibles
Siempre se conserva, no se puede destruir sólo transformar	Siempre se conserva en procesos reversibles, pero se reduce en procesos irreversibles
Es sólo una medida de cantidad	Es una medida de cantidad y de calidad
Puede ser calculada con base en cualquier estado de referencia asumido	El estado de referencia es impuesto por los alrededores
Se incrementa con el aumento de la temperatura	En procesos isobáricos, alcanza su valor mínimo a la temperatura del ambiente; a temperaturas menores se incrementa al descender T
En el caso de los gases ideales, no depende de la presión	Depende de la presión

2.8.1 Irreversibilidad

La irreversibilidad (I), también llamada reducción de exergía, se calcula realizando un balance y tomando la diferencia entre todos los flujos de exergía entrantes Ex_j y todos los flujos de exergía salientes Ex_k , incluidos los efluentes, es decir:

$$I = \sum_{\text{entradas}} Ex_j - \sum_{\text{salidas}} Ex_k \quad (2.7)$$

Otra forma de calcular la irreversibilidad está dada por la ecuación de Gouy-Stodola (*Szargut, 2005*), en donde el incremento de entropía se multiplica por la temperatura del ambiente, de acuerdo con:

$$I = T_0 \left[\sum_{\text{salidas}} S_k - \sum_{\text{entradas}} S_j \right] = T_0 \Delta S \quad (2.8)$$

Cada pérdida de exergía causa una disminución de la eficiencia del proceso o el sistema que se esté analizando, lo que lleva a un mayor consumo en energía y materia prima. Por ello, la presencia de irreversibilidades da indicio de posibles mejoras termodinámicas en el proceso o cadena de producción que se esté evaluando. En el caso de este estudio, se busca comparar opciones para así encontrar aquella que tenga la menor pérdida de exergía, sin dejar de lado las emisiones al ambiente.

2.9 Método de análisis de exergía

El principal objetivo del análisis de exergía es detectar y evaluar el efecto de los fenómenos irreversibles, los cuales incrementan la imperfección termodinámica de los procesos (*Szargut, 1980*).

La metodología general de aplicación de un análisis de exergía que será utilizada en esta tesis involucra los siguientes pasos. Esta metodología es un fragmento de la propuesta por Rivero y colaboradores (*1990*):

- i. Traducción del diagrama de flujo de proceso convencional en un diagrama de bloques incluyendo, además de las corrientes de materia y energía, servicios auxiliares, electricidad, gases producidos, pérdidas de calor a través de aislamientos térmicos, etc.
- ii. Cálculo de balances de materia y energía de cada bloque y global, a partir de los cuales se obtiene el balance de exergía; evaluación de la exergía de todas las corrientes involucradas.

- iii. Cálculo de los parámetros de funcionamiento de cada bloque: pérdidas de exergía irreversibles y efluentes totales.
- iv. Modificación del grado de agregación del análisis en caso de ser necesario.

2.10 Eficiencia

La eficiencia es una manera de cuantificar el efecto útil que tuvo el consumo de exergía y en esta tesis se presenta con el fin de comparar de manera objetiva el rendimiento de cada opción.

Existen tres definiciones para las eficiencias exergéticas para procesos en estado estable. La primera definición consiste en la relación del flujo de exergía saliente respecto del flujo de exergía entrante. La segunda es llamada eficiencia racional y fue definida por Kotas (1995) como la relación de la exergía deseada a la salida del sistema, respecto a la exergía usada, refiriéndose a la exergía deseada como la suma de todas las transferencias de exergía desde el sistema. La última forma de eficiencia fue introducida por Kostenko y luego desarrollada por Brodyansky, Sorin y Le Goff en 1994 (Cornelissen, 1997). Se define como la relación del flujo de exergía a la salida, entre el flujo total de exergía entrante, pero habiéndole sustraído a cada uno de estos dos términos los componentes de la exergía no transformados.

La eficiencia energética o eficiencia basada en la primera ley determinará el proceso más eficiente basado en el gasto mínimo de energía posible en relación a las entradas energéticas. Una eficiencia exergética o de la segunda ley determinará el proceso más eficiente basado en el mínimo gasto y destrucción posible del trabajo disponible de una entrada conocida de trabajo disponible.

2.10.1 Eficiencia simple

La forma más simple de eficiencia es la siguiente:

$$\eta = \frac{E_{salida}}{E_{entrada}} \quad (2.9)$$

para la cual es necesario realizar el correspondiente balance de exergía, utilizando la ecuación 2.7.

Como puede observarse es una definición que puede usarse para procesos, unidades de procesos, equipos, tecnologías, etc. Este valor siempre será menor que la unidad. Debido a que se están analizando cadenas completas de producción, se utilizará esta definición de eficiencia.

2.11 Aplicaciones del análisis de exergía

Actualmente en la literatura se pueden identificar un gran número de procesos que han sido evaluados por medio del análisis de exergía.

Existen aplicaciones del análisis de exergía en la industria petroquímica, como por ejemplo, en el estudio de los procesos de separación, el análisis de todo o parte de una refinería, así como del sector petrolero mexicano, como lo hace Santoyo-Hernández (2006). Esto permite determinar el grado de irreversibilidad de los procesos, cadenas de producción o sectores. En la industria del acero, de alimentos, de procesos químicos, mecánicos y térmicos, fuentes de energía renovables, etc., así como para la comparación de productos, se encuentra también una gran aplicación de este tipo de análisis.

La revisión de la literatura proporcionó información de la aplicación exitosa del análisis de exergía en diferentes áreas (Beccali *et al.*, 2003; Dewulf y Langenhove, 2004; Kotas, 1995; Szargut, 2005).

2.12 La exergía y su relación con el desarrollo sostenible

La Figura 2.4 muestra de manera cualitativa la relación que guarda la exergía con el impacto ambiental y la sostenibilidad. En esta figura se observa que la sostenibilidad aumenta y el impacto ambiental generado decrece, a medida que la eficiencia exergética va en aumento.

Mientras la eficiencia se acerca al 100%, los impactos ambientales se acercan a cero porque la exergía sólo es transformada, sin tener pérdidas de ningún tipo, ya sea en forma de efluentes y contaminantes o bien por consumo interno dentro del proceso. De la misma manera, la sostenibilidad se acerca al infinito debido a que el proceso se aproxima a la reversibilidad.

Por otra parte, cuando la eficiencia de exergía se aproxima al 0%, la sostenibilidad se acerca a cero ya que están siendo utilizados recursos con contenido de exergía pero no se está logrando ningún trabajo útil con ello. Así, el impacto ambiental se acerca a cero porque se necesita una cantidad cada vez mayor de recursos exergéticos para proveer un determinado servicio y la cantidad correspondiente de contaminantes con alto contenido de exergía (debido a que ésta no es aprovechada), son arrojados a la atmósfera.

También, con el objetivo de ayudar a contrarrestar los efectos ambientales, surgen proyectos como EOLSS (Encyclopedia of Life Support System), ecotecnología, así como aquellos relacionados con el concepto de exergía y otros indicadores ecológicos, los cuales están en aumento (Wall y Gong, 2001).

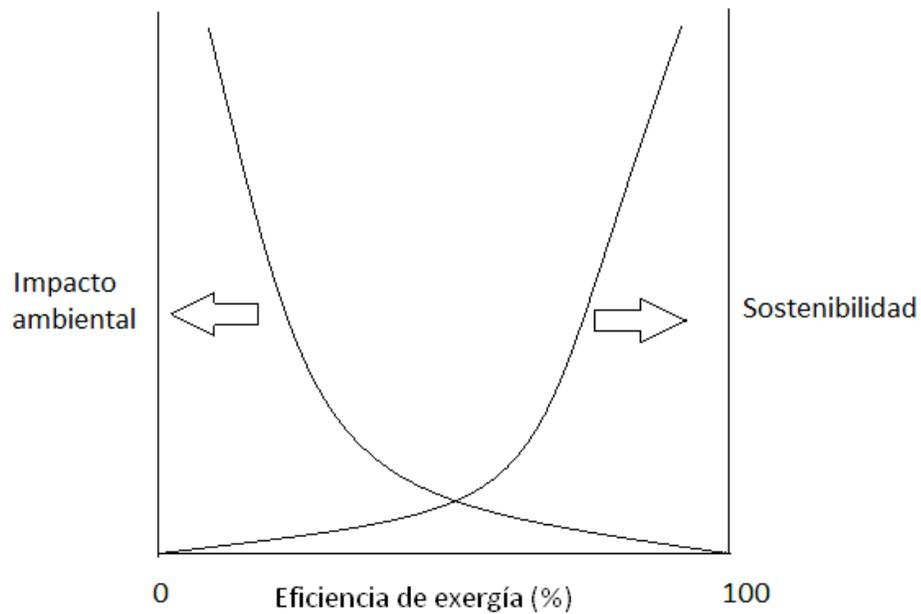


Figura 2.4. Ilustración cualitativa de la relación entre el impacto ambiental, la sostenibilidad de un proceso y su eficiencia exergética. Fuente: Dincer y Rosen, 2007

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y SU ADICIÓN CON EL ANÁLISIS DE EXERGÍA

En este capítulo se define en qué consiste un análisis de ciclo de vida (ACV), así como los componentes y los conceptos necesarios para su aplicación. Aprovechando los conceptos definidos sobre ciclo de vida y exergía, se define entonces el análisis de ciclo de vida exergético (ACVE), el cual proporciona las cantidades de exergía desde la materia prima básica de cada producto y su tecnología asociada hasta el producto final, así como las irreversibilidades (energía no aprovechable), coproductos y emisiones en todo ese ciclo de vida.

3.1 Introducción

Debido a la creciente preocupación por la conservación del medio ambiente y la importancia de conocer el impacto que tienen las actividades humanas en el mismo, se han ido desarrollando métodos para entender mejor y así contrarrestar los efectos que tienen estas actividades. Por lo anterior, existen hoy en día diversos instrumentos y herramientas para conseguir lo planteado por el desarrollo sostenible, es decir, para conseguir un equilibrio adecuado para el desarrollo económico, crecimiento de la población, uso racional de los recursos y protección y conservación del ambiente.

Las principales herramientas de gestión ambiental son: Análisis de ciclo de vida, análisis del flujo de sustancias, evaluación de tecnologías, estudio de impacto ambiental, análisis de riesgos ambientales, auditoría ambiental, análisis de línea de producto, análisis de la intensidad de recursos por unidad de servicio y la evaluación del comportamiento ambiental (*Fullana y Puig, 1998*).

En este caso es de interés el método de análisis de ciclo de vida, ya que a esta técnica se le puede aplicar un estudio empleando la segunda ley de la termodinámica, dando como resultado el análisis de ciclo de vida exergético, el cual es detallado más adelante. Esta herramienta es seleccionada también por su enfoque a productos, ya que en la presente tesis se analizan productos que buscan cumplir la misma función y debe recordarse que el impacto ambiental de un producto inicia con la extracción de las materias primas y termina cuando la vida útil del producto finaliza, convirtiéndose en un residuo que ha de ser gestionado adecuadamente.

El análisis de ciclo de vida (ACV), LCA por sus siglas en inglés, es una herramienta que busca identificar efectos ambientales derivados de la producción de un determinado bien o servicio. Se basa en una estructura sistémica enfocada a productos, en la cual se analizan todos los impactos ambientales producidos en cada una de las etapas y actividades que conforman su ciclo de vida, es decir, desde la adquisición de materias primas para su fabricación hasta la disposición final del producto.

Para ello el ACV identifica y cuantifica las entradas y salidas de materiales y energía en todas las etapas; posteriormente, determina, cuantifica y evalúa los impactos ambientales generados durante cada etapa y sienta las bases para la búsqueda de mejoras.

En el caso de este estudio, la importancia de esta herramienta radica en la identificación de la irreversibilidad durante el ciclo de vida completo, ya que esto permite evaluar el grado de perfección termodinámica de los procesos completos de producción, así como del uso del producto posterior a su fabricación, lo cual conduciría al análisis de las rutas de producción con mejor desempeño termodinámico y con menos daño al ambiente.

3.2 Metodología del análisis de ciclo de vida

Conforme a la norma ISO 14040:2006, se entiende por ciclo de vida una serie de etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema de producto y que va desde la adquisición de materias primas o la generación a partir de recursos naturales hasta su disposición final.

De acuerdo con la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), el análisis de ciclo de vida es definido como *“un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los desechos enviados al ambiente; para determinar el impacto que esos desechos y tales formas de utilizar la materia y la energía producen en el ambiente y para identificar y evaluar oportunidades para mejorar el medio ambiente. El análisis incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta la extracción y el procesamiento de materias primas, la producción, el transporte y distribución, el uso, la reutilización, el mantenimiento, el reciclado y la disposición del residuo”* (Consoli et al., 1993).

En un estudio de análisis de ciclo de vida se pueden distinguir 4 etapas:

i. Definición del objetivo y el alcance

El objetivo del estudio se determina en relación con la aplicación prevista, las razones por las cuales se realiza la evaluación y el público al que se le presentarán los resultados. La unidad funcional del producto, la escala espacial y el horizonte temporal tienen que ser determinados.

El alcance deberá ser lo suficientemente bien definido para asegurar que la amplitud, profundidad y detalle del estudio son compatibles y suficientes para hacer frente a la meta establecida. El

alcance incluye: el sistema del producto a ser estudiado, las funciones del sistema del producto, la unidad funcional, las fronteras del sistema y las suposiciones.

La unidad funcional define la cuantificación de las funciones identificadas (características de rendimiento que se desean analizar) del producto o servicio. El propósito principal de la unidad funcional es proporcionar una referencia con la cual están relacionadas las entradas y las salidas. Esta referencia es necesaria para garantizar la compatibilidad de los resultados del ACV y así poder realizar comparaciones entre los resultados, asegurando que dichas comparaciones se realizan con respecto a una base común.

Es necesario definir el sistema a estudiar y sus límites. Estas fronteras establecen las unidades de proceso que se tomarán en cuenta. La elección de los elementos del sistema depende de la definición de los objetivos y el alcance, su aplicación prevista, los supuestos y las limitaciones de información y monetarias.

La Figura 3.1 muestra un diagrama de ciclo de vida de un producto. El diagrama muestra que el ciclo empieza con la adquisición de materia prima, posteriormente se incluye en el ciclo la manufactura del producto, en la que las materias primas son transformadas. Después ocurre el uso del producto y su disposición, en la cual puede suceder su reutilización, reciclaje o bien algún tratamiento o disposición, como el relleno sanitario o la incineración para generar energía.

ii. Análisis de inventario

Consiste en la recopilación de datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes de un sistema de producto. El proceso de realizar un análisis de inventario es iterativo. Al ir obteniendo información y aprendiendo más sobre el sistema, pueden identificarse nuevas necesidades de información o limitantes. Los datos de cada unidad de proceso incluida en las fronteras se pueden clasificar en:

- Insumos de energía, de materias primas, insumos auxiliares y otros insumos físicos
- Productos, co-productos y residuos
- Emisiones a la atmósfera, contaminantes vertidos al agua y al suelo
- Otros aspectos medioambientales

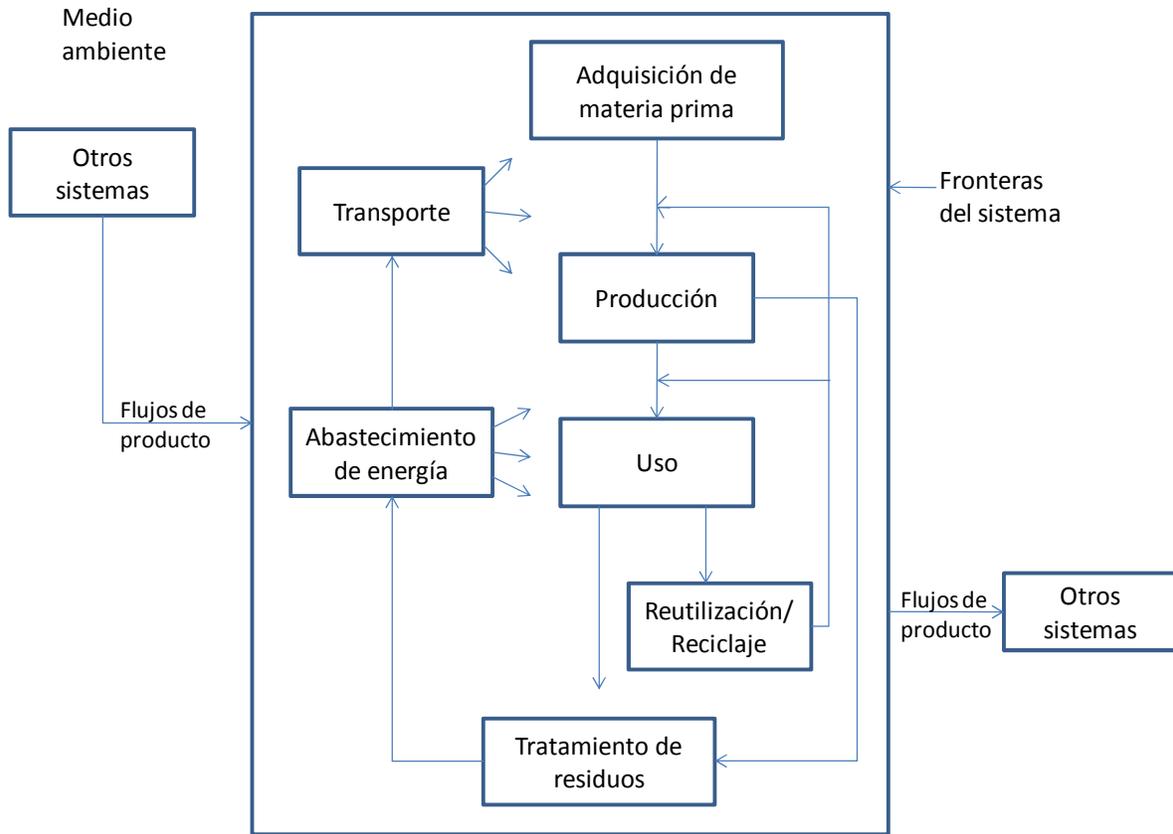


Figura 3.1. Ejemplo de un sistema de producto para un ACV. Fuente: ISO, 2006

En el análisis de inventario el ciclo de vida completo del producto se analiza conduciendo a una tabla de inventario, la cual consiste en una lista de entradas y de salidas para el medio ambiente.

iii. La evaluación de impacto

Tiene como objetivo la evaluación de los posibles impactos al medio ambiente utilizando los resultados del inventario de ciclo de vida. Esta evaluación es un proceso gradual. En la primera etapa, la clasificación, se trata de determinar qué efectos ambientales son considerados y cuáles extracciones y emisiones contribuyen a ella. Posteriormente, en la caracterización, la contribución de todas las extracciones y las emisiones de los problemas ambientales seleccionados son estimadas. Para una mejor interpretación del impacto de los efectos ambientales, éstos pueden ser normalizados al impacto real en algún área determinada. El paso final es la valoración de los problemas ambientales seleccionados. El nivel de detalle, la elección de los impactos evaluados y las metodologías utilizadas dependerán del objetivo y el alcance del estudio.

Los elementos de la evaluación del impacto de ciclo de vida son:

- A) Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización
- B) Asignación de los resultados del análisis de inventario
- C) Cálculo de los indicadores (caracterización)
- D) Perfil de la evaluación del impacto (resultados)

iv. Fase de interpretación

La interpretación es la fase del ACV en la cual los resultados de los análisis de inventario y la evaluación del impacto se consideran en conjunto. La fase de interpretación debe proporcionar resultados que sean coherentes con el objetivo y el alcance definidos y llevar a la formulación de conclusiones, explicar las limitaciones y formular recomendaciones. La interpretación debe reflejar el hecho de que los resultados se basan en un enfoque relativo, que indican los posibles efectos ambientales y que no predicen los impactos reales. Esta interpretación del ciclo de vida también intenta proporcionar los resultados de manera comprensible, completa y coherente, de acuerdo con la definición de objetivos y alcance del estudio.

Al tener una lista de efectos ambientales completamente diferentes entre sí, muchas veces se renuncia a unos para enfocarse en otros.

Para tales fines, se han desarrollado diversos indicadores de impacto. La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) define el término indicador como un *"parámetro o el valor resultante de un conjunto de parámetros, que ofrece información sobre un fenómeno, con un significado más amplio que el directamente asociado a la configuración del parámetro"*. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, añade que los indicadores *"cuantifican y simplifican información sobre aspectos complejos que a menudo derivan de investigaciones técnicas, son dependientes de un propósito y están abiertos a interpretación"* (UNEP, 2001). Los indicadores medioambientales, también llamados ecoindicadores, son parámetros que ofrecen información y/o tendencias acerca de la situación ambiental.

En Europa se han desarrollado ecoindicadores que permiten relacionar las prioridades de los impactos ambientales con actividades operativas o industriales. Entre ellos destacan el

Ecoindicador 95 y el 99, desarrollados en Holanda. En términos generales, el desarrollo de estos indicadores incluye un proceso de priorización de los impactos ambientales negativos que más afectan al país o región en donde se desarrollaron. Posteriormente, se seleccionan los materiales y procesos productivos más comunes y a cada uno se le asigna un puntaje basado en un análisis que toma en cuenta el daño a la salud humana, biodiversidad y consumo de recursos naturales (Ecoindicador 99) que ejerce el producto o proceso a lo largo de todo su ciclo de vida. El ecoindicador es el resultado de la suma de los impactos y se expresa como un puntaje dado por kilogramo de producto.

El problema asociado con el uso de un único indicador es que la valoración de su impacto en los distintos efectos ambientales es un proceso subjetivo.

Al ser una herramienta que considera todas las cargas ambientales, así como los recursos necesarios para la fabricación del producto, el ACV se ayuda de software y bases de datos especializados y así, es posible facilitar el manejo de los resultados. Algunos de estos programas de computadora incluyen el análisis exergético como una categoría de impacto ambiental, por ejemplo CICLOPE, SIMAPRO, ALBERTO, por mencionar algunos (*Montero-Alpírez, 2006*).

3.3 Análisis de ciclo de vida exergético

El estudio del consumo acumulado de exergía fue introducido en los años ochenta y tiene varios usos en el análisis de ciclo de vida. Por ejemplo, como un indicador aproximado de impacto ambiental total o al realizar una evaluación para proponer mejoras mediante la identificación de las pérdidas de energía útil. La exergía también puede ser utilizada como una medida del agotamiento y el uso de la energía y los recursos materiales (*Finnveden y Östlund, 1997*).

Hay dos ventajas principales del análisis exergético. En primer lugar, todos los materiales se pueden expresar en la misma unidad, en joules de exergía, por ejemplo. En segundo lugar, esta base permite hacer un análisis minucioso y objetivo de los procesos industriales con respecto a su consumo de recursos y su eficiencia. La evaluación de la sostenibilidad se basa en el cálculo del consumo acumulado de exergía (CExC, por sus siglas en inglés), teniendo en cuenta la exergía de los recursos necesarios para generar el producto (*Dewulf y Van Langenhove, 2002*).

El primero en proponer la realización de un ACV pero desde el punto de vista exergético, fue Szargut (1987). Es llamado el análisis del consumo acumulado de exergía (CAEx), que es la exergía utilizada y acumulada desde la extracción de los recursos naturales hasta obtener el producto final. Este método es muy parecido al cálculo del requerimiento bruto de energía (GER) propuesto por Slesser (Szargut, 2005).

En el CAEx o CExC se toman en cuenta solamente la producción y el uso del producto o material. El consumo de exergía se acumula hasta un punto definido en el ciclo de vida. Sin embargo, en este método la reducción de exergía asociada con la eliminación de los productos y la influencia del reciclado que causan cambios en la reducción de exergía no se consideran.

Tomando como base el enfoque sobre el ciclo de vida en combinación con los análisis exergéticos, se ha desarrollado el análisis del ciclo de vida exergético (ACVE) ya mencionado en el capítulo anterior. El ACVE es una extensión del ACV y proporciona un mejor parámetro acerca del agotamiento de los recursos naturales gracias al concepto de irreversibilidad en el ciclo de vida de un producto o un proceso.

La definición de los objetivos y el alcance es idéntica a la que se realiza en un ACV. El análisis de inventario en un ACVE es más extenso. Se requiere de un diagrama de flujo completo conteniendo las corrientes másicas y de energía de cada etapa en la producción. Los balances de energía y masa deben ser cerrados.

También puede usarse el enfoque simplificado de caja negra, en donde sólo se toman en cuenta las entradas y salidas de los procesos de producción.

La evaluación del impacto está limitada al cálculo de la exergía en los flujos y la determinación de la reducción de exergía en los diferentes procesos. Para el cálculo de la exergía se deben especificar las condiciones y la composición del ambiente.

La acumulación de toda la reducción de la exergía durante el ciclo de vida resulta en la irreversibilidad del ciclo de vida del producto. El análisis de mejora debe proponer acciones encaminadas a la minimización de la irreversibilidad del ciclo de vida. Cuando en el análisis de inventario se utilizó el enfoque de caja negra, sólo se pueden comparar en el análisis de mejora diferentes opciones para las cajas negras.

Cornelissen (1997) también explora este análisis. En ese documento, uno de los casos de estudio es la comparación entre el ciclo de vida exergético de vasos desechables de poliestireno (PS) contra el desempeño en el ciclo de vida exergético de una taza de porcelana. Este caso se resume a continuación a manera de ejemplo.

Para realizar el estudio, Cornelissen considera como unidad funcional el uso de 3000 vasos desechables de poliestireno, así como el utilizar 3000 veces la taza de porcelana. Los resultados de su análisis son resumidos en las Figuras 3.2 y 3.3.

En estos esquemas los flujos de exergía se encuentran todos en Megajoules (MJ), Cornelissen incluye el cálculo de las Irreversibilidades (I), así como de la eficiencia (η) de cada etapa.

En el caso de la taza de porcelana, se considera el uso de un lavavajillas, por lo cual se incluye la etapa de generación de electricidad para su funcionamiento, así como el consumo de detergentes los cuales requieren y, una vez utilizados liberan fosfatos. También se considera el agua empleada para el lavado y su tratamiento y reutilización.

La exergía perdida en el ciclo de vida de 3000 vasos de poliestireno es 821 MJ, mientras que la exergía perdida en el ciclo de vida de la taza de porcelana (utilizada 3000 veces) es de solo 432 MJ, un factor de 1.85 menos, como puede verse en las Figuras 3.2 y 3.3. Cabe destacar que dentro de los límites que él definió para el análisis no se encuentran la extracción del petróleo para el caso del poliestireno ni la exergía que conlleva la extracción de la materia prima (arcilla) para el caso de la taza.

Este tipo de análisis es el que será aplicado en este caso, con las modificaciones debidas; por ello, en el Capítulo IV se describe la metodología general que se propone para aplicar un análisis de ciclo de vida exergético. Asimismo, en el Capítulo V se aplicará esta metodología en el caso de estudio, el cual en esta tesis corresponde a la evaluación de las bolsas desechables fabricadas de polietileno, así como evaluar algunas propuestas para la sustitución de las mismas.

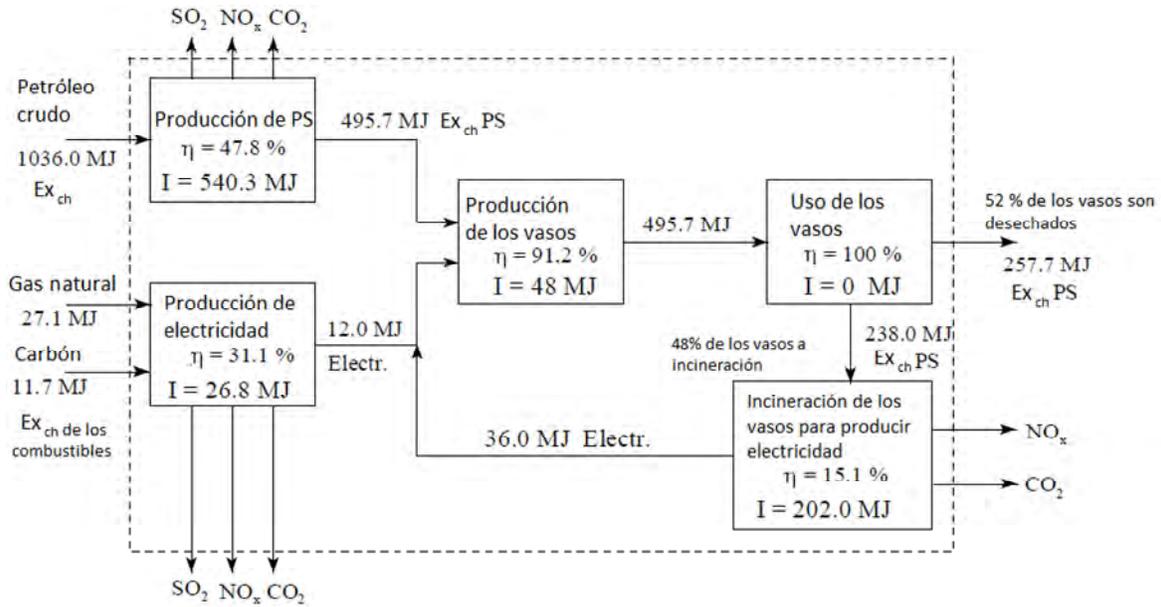


Figura 3.2. Diagrama de exergía para el ciclo de vida de 3000 vasos de poliestireno. Fuente: Cornelissen, 1997

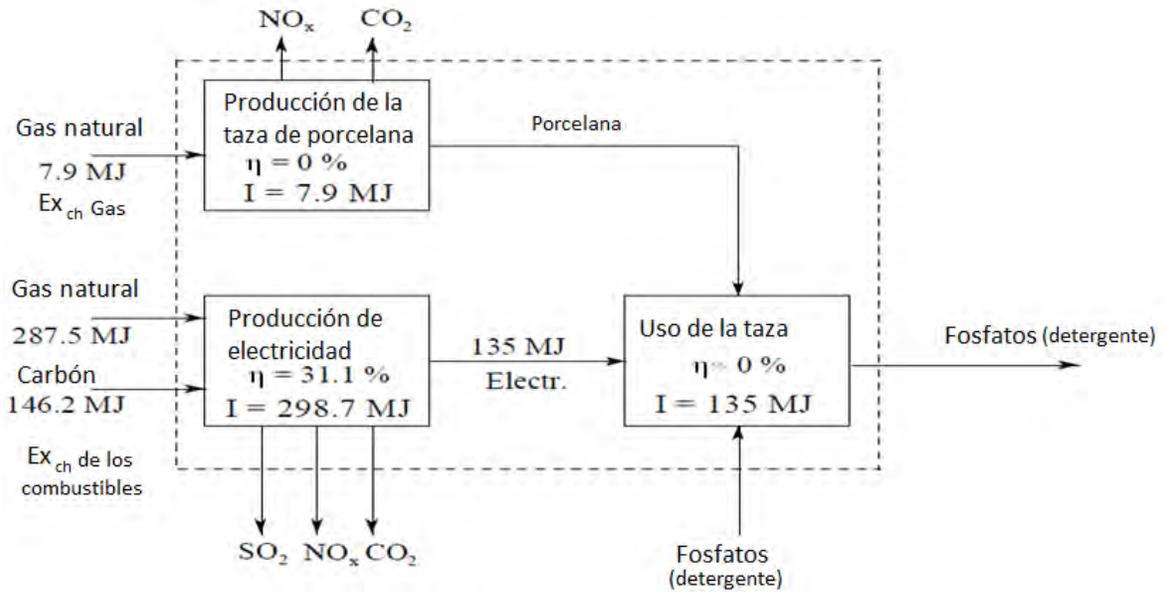


Figura 3.3. Diagrama de exergía para el ciclo de vida de una taza de porcelana. Fuente: Cornelissen, 1997

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA GENERAL DE ANÁLISIS

En este capítulo se toman como base los primeros tres capítulos para definir una metodología general de análisis que tiene en cuenta los cálculos de los balances de energía, materia y exergía en el ciclo de vida de cualquier producto y/o proceso de producción, así como un elemento que mida el beneficio económico de la cadena de producción. En este apartado se presentan las ecuaciones que serán utilizadas en este estudio de caso en particular. Por último, se describe la metodología con criterios múltiples para la ayuda en la toma de decisiones que será utilizada para seleccionar la mejor opción.

4.1 Esquema general

El marco de referencia de la presente tesis se basa en una interrelación entre el desarrollo sostenible, la conservación y el uso racional de los recursos naturales, y el uso eficiente de la energía, puntualizando la relación multilateral que guardan estos últimos con el desarrollo sostenible.

La importancia de los recursos naturales yace en su potencial de aprovechamiento para la sociedad, al ser los insumos necesarios para que ésta desarrolle sus actividades y satisfaga así varias de sus necesidades básicas.

La energía puede ser vista también como un recurso, considerando su capacidad para satisfacer la demanda de energía en todas sus formas y fines, incluyendo procesos de producción y para realizar trabajo. Como una medida del aprovechamiento de este importante recurso se presenta la exergía, la cual es considerada un elemento clave en el modelo energía-economía-ecología. Este modelo se ha discutido desde hace algunos años, cuando existió la preocupación de atender los problemas de carácter energético hacia el desarrollo de políticas sustentables (*Rivero y Anaya, 1997*). En este modelo, la primera relación (energía – economía) se dio a partir de la crisis energética de los años 70, partiendo de la necesidad de considerar no sólo la cantidad de energía utilizada sino además la calidad que posee. Por su parte, la relación energía – ecología surgió con el creciente consumo de combustibles fósiles, al derivar el uso de estos en emisiones dañinas al medio ambiente.

Como se describió en el capítulo tercero, el análisis de ciclo de vida (ACV), es una herramienta de gestión ambiental que busca identificar efectos ambientales, contabilizando las cargas al medio generadas por las etapas de vida de un producto o servicio y fue elegido para esta tesis ya que a esta técnica se le puede adicionar un estudio empleando la segunda ley de la termodinámica, dando como resultado el análisis de ciclo de vida exergético.

La forma en que estos conceptos interactúan para dar sustento a esta tesis se representa en la Figura 4.1.

El ACV se basa en una estructura sistémica enfocada a productos, en la cual se analizan todos los impactos ambientales producidos en cada una de las etapas y actividades que conforman su ciclo de vida.

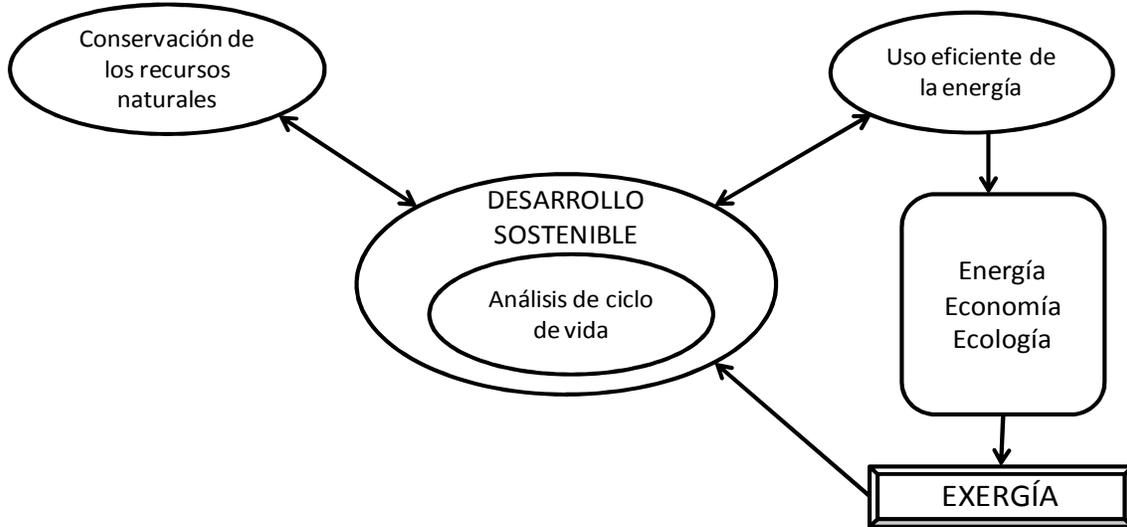


Figura 4.1. Marco de referencia. Fuente: *Elaboración propia*

El análisis de ciclo de vida extendido con la aplicación del análisis de exergía o análisis de ciclo de vida exergético (ACVE) examina los flujos de exergía dentro de un sistema y tiene como objetivo buscar la reducción de la exergía y mejorar la eficiencia de procesos y sistemas.

Para el análisis de este estudio de caso, la importancia de esta herramienta radica en la identificación de la irreversibilidad durante el ciclo de vida completo, ya que esto permite evaluar el grado de perfección termodinámica de los procesos completos de producción, así como del uso del producto posterior a su fabricación, lo cual conduciría al análisis de las rutas de producción con mejor desempeño termodinámico y con menos daño al ambiente.

Teniendo como base el marco de referencia propuesto de acuerdo con la Figura 4.1, la Figura 4.2 muestra la contribución de esta tesis al estado del arte. Se presenta una metodología integral donde los conceptos de ciclo de vida, exergía y el valor del producto, como variable económica, son aplicados al análisis de los productos que son el caso de estudio de la presente tesis y que se pretende que pueda aplicarse en forma general al análisis de cualquier otro producto que se

requiera evaluar utilizando estos criterios. Para la ayuda en la toma de decisiones entre el producto actual y sus posibles substitutos se utiliza la ayuda de la toma de decisiones multicriterio.

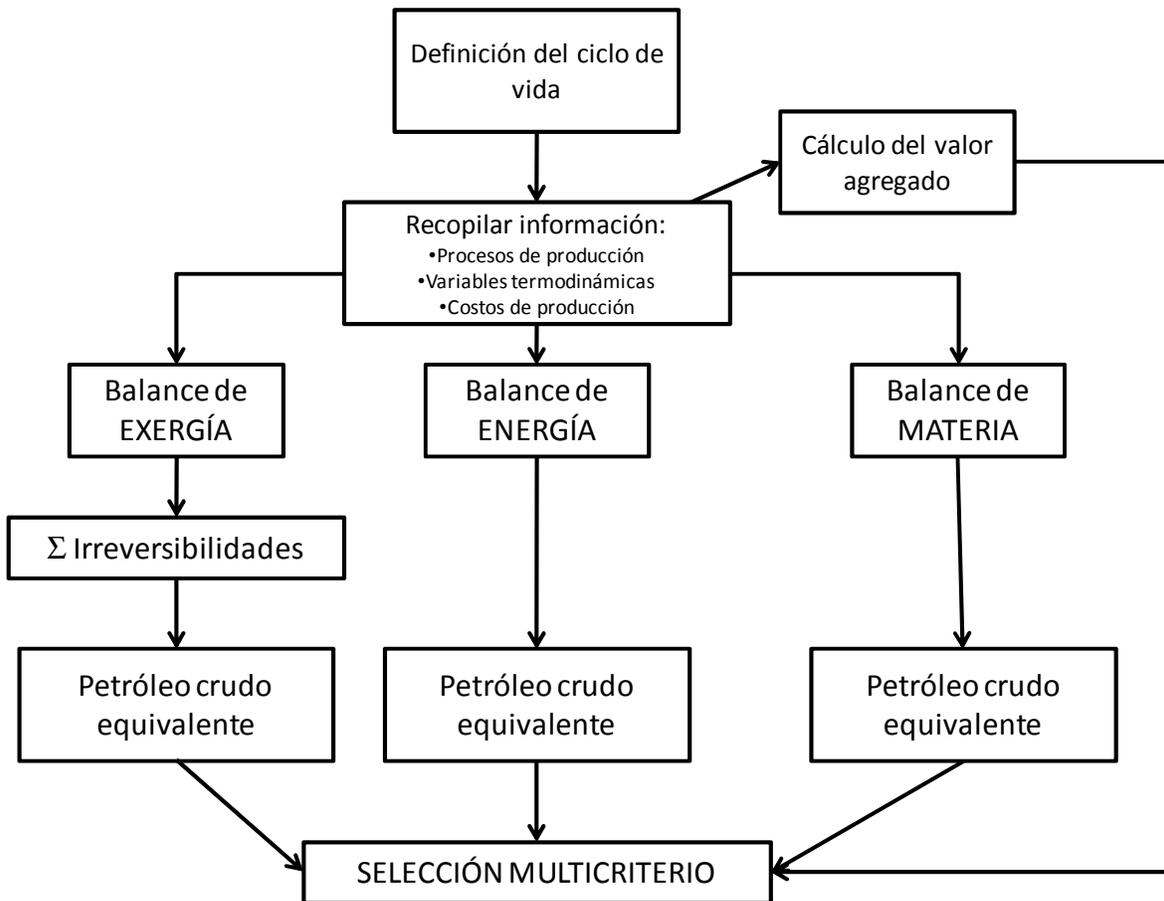


Figura 4.2. Metodología propuesta para evaluar materiales con la misma función. Fuente:

Elaboración propia

Como se observa en la figura anterior, es importante enunciar primero el objetivo del estudio, así como su alcance, para establecer así las fronteras del sistema a analizar y definir el ciclo de vida del producto a evaluar. Es aquí donde se define la unidad funcional, que como se dijo en el Capítulo III, es aquella a la que irán referidas todas las entradas y salidas del sistema, al ser la unidad de referencia para poder comparar entre sí los productos.

Enseguida, se recopila la información necesaria acerca de cada uno de los procesos de producción involucrados: cantidad de materia prima, de productos, de emisiones, así como de servicios auxiliares requeridos; condiciones de operación (presión, temperatura), condiciones, reactivos y productos de reacción (en los casos donde estén presentes). Lo anterior se requiere para realizar los correspondientes balances de materia y energía y con ellos llegar al balance de exergía y al cálculo de las irreversibilidades tanto del proceso como de la cadena completa de producción.

Para tener los resultados de cada uno de los balances en unidades más uniformes para que sean susceptibles de compararse, se realiza una transformación a unidades equivalentes de petróleo crudo. Con ello se puede también tener una idea de la magnitud que se está utilizando de este recurso en el ciclo de producción de cada uno de los materiales analizados.

Por último, al conocer el valor numérico de cada uno de los parámetros (exergía, energía, materia y valor del producto), se aplica un método multicriterio para jerarquizar y ordenar las opciones y ayudar a la toma de decisiones.

El análisis de ciclo de vida exergético aquí presentado corresponde a un esfuerzo por difundir este método en aplicaciones en las que se necesite comparar el rendimiento de productos que cumplen la misma función, en la satisfacción de una necesidad, por ejemplo, con respecto a un conjunto de variables que se tomarán para calificar y cuantificar dicho desempeño.

El análisis se lleva a cabo considerando las cadenas completas de producción de las bolsas desechables para el comercio, entendiendo como cadena de producción al conjunto de productos y procesos que a partir de una materia prima dada conducen a un producto específico de forma integrada, es decir, no aisladamente. Una cadena de producción se forma cuando los productos de un proceso resultan ser la materia prima de otros (*Escobar-Toledo, 1995*).

Al definir el alcance del estudio por medio del análisis de ciclo de vida se establecen los límites del sistema a estudiar, lo que muestra qué procesos serán incluidos en el análisis y, de esta manera, se identifican las necesidades de información acerca de las condiciones de los procesos de producción, las variables termodinámicas y los costos involucrados en los mismos.

4.2 Método de análisis de exergía

El principal objetivo del análisis de exergía es detectar y evaluar el efecto de los fenómenos irreversibles, los cuales incrementan la imperfección termodinámica de los procesos (Szargut, 2005).

La metodología general de aplicación de un análisis de exergía que será utilizada en esta tesis involucra los siguientes pasos:

- v. Traducción del diagrama de flujo de proceso convencional en un diagrama de bloques incluyendo, además de las corrientes de materia y energía, servicios auxiliares, electricidad, gases producidos, pérdidas de calor a través de aislamientos térmicos, etc.
- vi. Cálculo de balances de materia y energía de cada bloque y global, a partir de los cuales se obtiene el balance de exergía; evaluación de la exergía de todas las corrientes involucradas.
- vii. Cálculo de los parámetros de funcionamiento de cada bloque: pérdidas de exergía irreversibles, efluentes y totales, eficiencia de cada bloque.
- viii. Modificación del grado de agregación del análisis en caso de ser necesario.

4.2.1 Aplicación del análisis de exergía a un proceso

Para analizar un proceso desde el punto de vista de la segunda ley se han desarrollado diversas metodologías; no obstante, en esta tesis se utilizará la metodología propuesta por Rivero (1994), llamada método de bloques. En este método cada bloque representa un proceso, un equipo o un conjunto de ambos. El grado de agregación de estos bloques depende del objetivo del estudio. Al bloque entran corrientes de materia, calor y trabajo, como puede verse en la Figura 4.3.

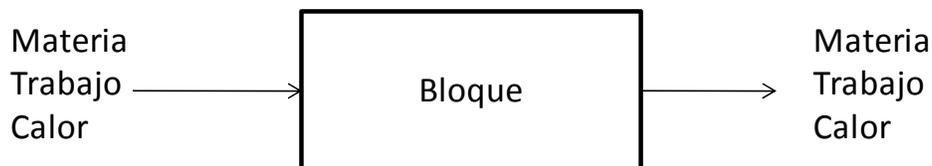


Figura 4.3 Entradas y salidas de un bloque. Fuente: Rivero, 1994

4.2.2 Cálculo de la exergía química de las sustancias involucradas

Debido a que para la mayoría de los recursos naturales la exergía química constituye la mayor parte del valor exergético de las mismas, en esta tesis se calcula la exergía química únicamente.

Los valores de exergía química estándar de los elementos se encuentran reportados en la bibliografía, siendo la principal contribución la realizada por Szargut y colaboradores (1988, 1989). Para obtener la exergía química de elementos y algunos compuestos, Szargut y colaboradores definen una metodología detallada donde se toma en cuenta la concentración promedio de las especies de referencia en el medio ambiente.

Szargut y colaboradores (1988, 1989) propusieron, además, una ecuación que permite calcular la exergía química de una sustancia i , conociendo la exergía química de los elementos que la conforman, así como la energía de Gibbs del compuesto. Dicha ecuación es la siguiente:

$$ex_{ch,i}^0 = \Delta G^0 + \sum_{el} v_{el} ex_{ch,el}^0 \quad (4.1)$$

donde:

ΔG^0 es la energía de Gibbs del compuesto i (kJ/mol)

v_{el} , $ex_{ch,el}^0$ corresponde al número de moles, y la exergía química estándar (kJ/mol) de los elementos que constituyen el compuesto, respectivamente.

Para calcular la energía libre se requieren la entalpía de formación y la entropía, tanto de los productos como de los reactivos de la reacción, ΔG^0 se obtiene entonces con:

$$\Delta G^0 = \Delta H_f^0 - T_0 \Delta S^0 = (\sum H_{f,productos}^0 - \sum H_{f,reactivos}^0) - T_0 (\sum S_{productos}^0 - \sum S_{reactivos}^0) \quad (4.2)$$

donde las unidades correspondientes son H_f^0 (kJ/mol) y S^0 (kJ/mol K).

Para algunos compuestos, los datos de energía de Gibbs se pueden encontrar en manuales de Ingeniería Química o libros de termodinámica, o bien pueden ser tomados de la base de datos de simuladores de procesos como el Aspen Plus de la compañía AspenTech®.

En el caso de algunos compuestos, no se tiene información termodinámica exacta, o bien, se desconoce su composición (por ejemplo, combustibles sólidos, petróleo, gasolinas), lo cual hace difícil determinar la entropía de reacción con precisión (Kotas, 1995). Szargut y Styrylska (1964)

supusieron que la razón entre la exergía química estándar y el poder calorífico neto (PCN) para combustibles sólidos y líquidos industriales es la misma que para las sustancias químicas puras teniendo la misma relación de componentes químicos. Esta relación está expresada por:

$$\varphi = \frac{ex^0}{(PCN)} \quad (4.3)$$

A pesar de contar con valores de exergía química de diversos compuestos, se han desarrollado fórmulas heurísticas que permiten calcular este valor φ en función de la composición de la sustancia y así aplicar la ecuación anterior para conocer la exergía química.

En el caso de sustancias orgánicas contenidas en los combustibles fósiles sólidos que consiste en C, H, O y N, con una proporción de la masa de oxígeno a carbono menor de 0.667, se aplica la siguiente expresión en términos de relaciones de masas:

$$\varphi = 1.0437 + 0.1882 \frac{H}{C} + 0.0610 \frac{O}{C} + 0.0404 \frac{N}{C} \quad (4.4)$$

donde C, H, O y N, son las fracciones en masa de C, H, O y N, respectivamente.

Para los combustibles fósiles con la relación de masa $0.667 < \text{oxígeno/carbono} < 2.67$ que, en particular incluyen la madera y que en este caso se aplica al ser el papel uno de los sustitutos:

$$\varphi = \frac{1.0438 + 0.1882 \frac{H}{C} - 0.2509 \left(1 + 0.7256 \frac{H}{C}\right) + 0.0383 \frac{N}{C}}{1 - 0.3035 \frac{O}{C}} \quad (4.5)$$

Para los combustibles líquidos, el efecto del azufre fue incluido en la correlación dando la expresión:

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \frac{H}{C} + 0.0432 \frac{O}{C} + 0.2169 \frac{S}{C} \left(1 - 2.0628 \frac{H}{C}\right) \quad (4.6)$$

Una correlación utilizada para calcular el poder calorífico neto, PCN, de compuestos orgánicos es la que se utilizará en la presente tesis:

$$PCN = 34.8C + 93.8H + 10.46S + 6.28N - 10.8O \quad (4.7)$$

donde C, H, O, N y S corresponden a la fracción masa de esos elementos en el compuesto orgánico.

Las ecuaciones 4.3 a 4.6 se encuentran en la literatura (Kotas, 1995), mientras que la ecuación 4.7 fue tomada de Santoyo-Hernández (2006).

Como ejemplo, se presenta el cálculo de la exergía química estándar del trióxido de azufre, SO_3 . La energía de Gibbs a condiciones estándar del compuesto SO_3 corresponde a 366.5 kJ/mol. El valor de la exergía estándar de los elementos que constituyen este óxido es de 609.6 kJ/mol para el azufre y 3.97 kJ/mol para el O_2 . Utilizando la ecuación 4.1, la exergía química estándar del SO_3 resulta:

$$ex_{ch,SO_3}^0 = -366.5 + 609.6 + 1.5 \times 3.97 = 249.1 \text{ kJ/mol}$$

4.2.3. Desarrollo de los cálculos de acuerdo con la metodología

El análisis exergético iniciará desde el proceso del procesamiento de petróleo crudo, hasta la producción de polietileno de baja y alta densidad (PEBD y PEAD), así como del polipropileno (PP).

Utilizar la exergía para un análisis de productos como los del presente caso de estudio, complementa un análisis de energía del ciclo completo de vida (considerando sólo la primera ley de la termodinámica). Se ha encontrado en la bibliografía que, aplicando este último, las bolsas de polietileno tienen un mejor desempeño durante su ciclo de vida comparadas con aquellas fabricadas de otros materiales, incluyendo las bolsas hechas con materiales renovables (Chaffee y Yaros, 2007). No necesariamente se espera obtener los mismos resultados que en un estudio cuantificando sólo la cantidad de energía, ya que en el trabajo de Chaffee y Yaros no se consideran otras variables como ha quedado presentado en la explicación de la metodología utilizada en la presente tesis.

4.3 Métodos multicriterio

Debido a que la comparación de las opciones se realiza bajo la medición de diversos criterios, que fueron escogidos por considerar diferentes variables durante todo el ciclo de vida y son representativas del uso de la energía, el agotamiento de los recursos no renovables y la consecuente contaminación que se produce, así como una variable representativa de la economía

del producto, se escogieron los siguientes criterios que se utilizan en la metodología de métodos multicriterio para seleccionar las opciones que mejor los cumplan y que a continuación se enumeran:

1. La maximización del contenido de exergía.
2. La minimización del uso de recursos no renovables durante la cadena completa de producción del material.
3. El mínimo uso de energía durante la cadena completa de producción del material.
4. El mínimo número de emisiones a la atmósfera.
5. El máximo valor del producto⁹.

Los métodos de análisis multicriterio, también llamados *métodos de análisis con criterios múltiples*, tienen por objetivo proporcionar a los tomadores de decisión herramientas que les permitan resolver un problema donde deben tomarse en cuenta varios puntos de vista (criterios), la mayoría de las veces contradictorios. La primera constatación que debe hacerse, cuando se abordan este tipo de problemas, es que no existe forzosamente una decisión que sea la mejor simultáneamente para todos los puntos de vista (criterios) (Tamiz, 1996).

Los beneficios de los métodos multicriterio, descritos en la literatura (Roy, 1985), son que estos, son simples, convenientes y de fácil uso, son fáciles de aprender a implementar y proveen un camino eficiente para resolver problemas donde se deben considerar múltiples criterios (Escobar-Toledo et al., 1990; Bana e Costa y Vansnick, 1999).

Las técnicas de métodos multicriterio se clasifican en tres grupos:

1. Teoría de la utilidad de múltiples criterios (MAUT, Multi Attribute Utility Theory)
2. Métodos de sobreclasificación (OM, Outranking Methods)
3. Métodos interactivos (IM, Interactive Methods)

⁹ Se define el valor del producto como la suma del costo total de producción más un porcentaje de ganancia sobre la inversión (Return On Investment, ROI).

Los métodos de utilidad de múltiples criterios (MAUT) consisten en la agregación de factores desde el punto de vista de una función objetivo, la cual será optimizada. La función objetivo es el punto principal para el análisis. La suposición que subyace es que las funciones son restrictivas. Sin embargo, si la función de utilidad está disponible para el tomador de decisiones, el problema se reduce a un simple caso de maximización directa de la función objetivo. MAUT, está soportada por paquetes de cómputo, tales como: "Logical Decision" (Saaty y Vargas, 1994).

Los métodos de sobreclasificación (OM), generalmente, se construyen a través de una relación de sobreclasificación, la cual representa las preferencias del tomador de decisiones. Los OM, suponen que el tomador de decisiones puede, quiere y sabe definir los cambios entre los objetivos (Roy y Bouyssou, 1993). Lo anterior implica que puede derivarse la no agregación de la función de utilidad. Los rangos entre los cuales se analizan los criterios estarán basados en la comparación entre pares. Los paquetes de cómputo que utilizan este tipo de metodologías son: PROMCALC-GAIA (Brans y Mareschal, 1994), ELECTRE (Roy, 1973), MACBETH (Bana e Costa y Vansnick, 1997), entre otros. Los OM, operan como funciones escalares entre las posibles opciones de cada criterio, cuando el tomador de decisiones proporciona pesos a los criterios. El tomador de decisiones analiza con un número dado de parámetros, los cuales establecen las relaciones de sobreclasificación.

Por su parte, un método Interactivo (Vincke, 1989) es un procedimiento que consiste en fases alternadas de cálculo y discusión. En cada interacción se examina una acción (o grupo de acciones) y el tomador de decisiones incorpora esa información al proceso de solución. La discusión entre las etapas le permite considerar las propuestas del analista y dar información adicional acerca de sus preferencias, que se introducen en el modelo en la siguiente fase del cálculo.

La mayoría de los métodos interactivos propuestos se refieren a programas lineales multiobjetivos. Existen formas de comparar estos métodos para utilizar el más adecuado de acuerdo con las condiciones especiales del problema y obtener el mejor resultado.

Bajo la notación donde a_i = i -ésima opción y g_j = evaluación del criterio j , entonces $g_j(a_i)$ representa la evaluación del criterio j sobre la i -ésima opción. Los datos básicos de un problema multicriterio consisten en la evolución de la Tabla 4.1.

La incomparabilidad se fundamenta cuando una opción es mejor que otra en un criterio s , y ésta última es mejor que la primera en un criterio r . Entonces es imposible decidir cuál es mejor sin información adicional. Ambas opciones son, por lo tanto, incomparables. Como información adicional se puede tener:

- Pesos que asignan una importancia relativa de los criterios
- Agregar una función que reúna todos los criterios y sea de una sola variable, de tal forma que sea posible obtener un problema mono-criterio, para el cual sí existiría una solución óptima.

Tabla 4.1. Tabla de evaluación multicriterio donde a, a_1-a_n representan opciones y $g_1(a_1)-g_k(a_n)$ la evaluación del criterio g_1 sobre la opción a_1 , hasta el g_k sobre la opción a_n . Fuente: Brans y Mareschal, 2002

a	$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$	---	$g_j(\cdot)$	---	$g_k(\cdot)$
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	---	$g_j(a_1)$	---	$g_k(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	---	$g_j(a_2)$	---	$g_k(a_2)$
\vdots	\vdots	\vdots	\diagdown	\vdots	\diagdown	\vdots
a_3	$g_1(a_3)$	$g_2(a_3)$	---	$g_j(a_3)$	---	$g_k(a_3)$
\vdots	\vdots	\vdots	\diagdown	\vdots	\diagdown	\vdots
a_n	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	---	$g_j(a_n)$	---	$g_k(a_n)$

Las relaciones de dominancia asociadas con un problema multicriterio se presentan en la Figura 4.4.

$$\begin{cases}
 g_j(a) \geq g_j(b) \\
 g_k(a) > g_k(b) \\
 g_j(a) = g_j(b)
 \end{cases}
 \Leftrightarrow aPb$$

$$\begin{cases}
 g_s(a) > g_s(b) \\
 g_r(a) < g_r(b)
 \end{cases}
 \Leftrightarrow aRb$$

Figura. 4.4. Relaciones de dominancia donde g_j, g_k, g_s, g_r son las evaluaciones de los criterios j, k, s y r , a y b representan opciones a evaluar y P, I y R indican preferencia, indiferencia e incomparabilidad, respectivamente. Fuente: Brans y Mareschal, 2002

El propósito de todos los métodos multicriterio es el de reducir el número de incomparabilidades (R). Una manera de lograr esto es construyendo relaciones de rangos, ya sea de superioridad o de inferioridad. En tal caso no todas las incomparabilidades son eliminadas pero la información es fidedigna.

El método jerárquico multicriterio (AJM, Analytic Hierarchy Process) tiene por objeto la descomposición del problema en niveles jerárquicos para determinar en forma clara, a través de la síntesis de los valores de los agentes de decisión, una medida global para cada una de las opciones, priorizándolas o clasificándolas hasta el final. Este método de escalamiento proporcional es usado para asistir a las personas en la toma de decisiones. En la Figura 4.5 se puede apreciar una jerarquía de tres niveles para la resolución de un problema en particular.

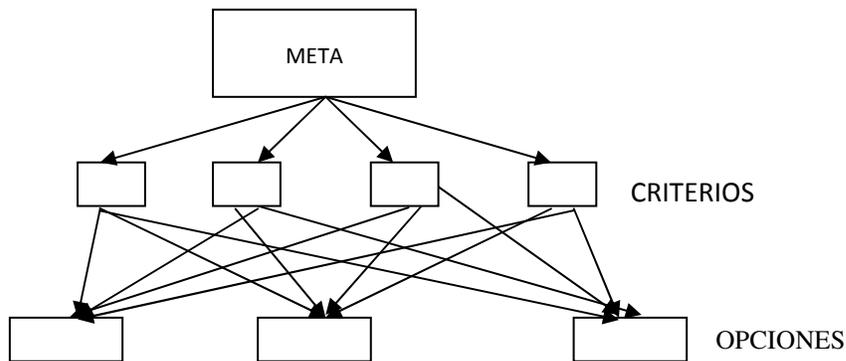


Figura 4.5. Jerarquía de tres niveles. Fuente: Escobar-Toledo, 2009

4.3.1. Forma de estructurar una jerarquía

La consistencia para trabajar una jerarquía es partiendo de la meta hacia las opciones y luego de las opciones hacia la meta para hacer posibles las comparaciones. En la solución de los problemas por medio del método AJM se tienen diez pasos significativos:

- 1.- Identificar la meta global. ¿Cuál es el objetivo que se desea alcanzar? ¿Cuál es el problema principal?
- 2.- Identificar las submetas asociadas a la meta global. Si es relevante deben identificarse los horizontes de tiempo que afectan a la decisión.

- 3.- Identificar los criterios que deben satisfacerse para satisfacer las submetas asociadas a la meta global.
- 4.- Identificar los subcriterios asociados a los criterios. Los criterios y subcriterios se pueden especificar en términos de rangos de valores de los parámetros o en términos cualitativos (alto, medio, bajo, etcétera).
- 5.- Identificar los actores involucrados.
- 6.- Identificar las metas de los actores.
- 7.- Identificar las políticas de los actores.
- 8.- Identificar opciones (alternativas) o resultados.
- 9.- Tomar el resultado preferido y comparar la relación de beneficio / costo y de tomar la decisión contra aquélla de no tomarla.
- 10.- Llevar a cabo el análisis beneficio / costo utilizando valores marginales. Debido que el precio involucra jerarquías dominantes, es necesario preguntarse cuál opción proporciona el mayor beneficio. Si lo que se trata de analizar es el costo, es necesario preguntarse qué opción proporciona el mayor costo.

4.3.2. Metodología PROMÉTHÉE

La metodología PROMÉTHÉE, la cual se aplicará en el presente trabajo, toma en cuenta, por su parte, varias condiciones que son (*Brans et al.; Brans y Mareschal, 1984, 1992, 1994, 2002*):

1. Consideración de las diferencias entre las evaluaciones de las acciones de cada criterio.
2. Eliminación de los efectos de escala entre criterios enunciados de manera subjetiva u objetiva.
3. Incomparabilidad admitida, conceptualizando las comparaciones de sobreclasificación en: preferencia estricta, indiferencia e incomparabilidad que permitirán la búsqueda de información y las funciones de utilidad para y del tomador de decisiones.
4. Aportación de información suplementaria.
5. Aspectos considerados en conflicto de los criterios.
6. Interpretación correcta de los pesos o importancia de cada criterio.

La estructura de preferencias de PROMÉTHÉE está basada en comparaciones de pares de opciones evaluadas en los criterios. Se considera la desviación entre las evaluaciones de dos alternativas. Para desviaciones pequeñas, el tomador de decisiones asignará una preferencia pequeña para la mejor opción e incluso puede considerar que no hay preferencia alguna si él considera que la desviación es insignificante.

PROMÉTHÉE considera que las preferencias son números reales que varían entre 0 y 1. Esto significa que para cada criterio el tomador de decisiones tiene en mente una función del tipo:

$$P_j(a,b) = F_j[d_j(a,b)] \quad (4.8)$$

donde

$$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (4.9)$$

y, para la cual:

$$0 \leq P_j(a,b) \leq 1 \quad (4.10)$$

En el caso de que el criterio deba ser maximizado, esta función daría la preferencia de a sobre b, debido a las desviaciones observadas entre sus evaluaciones sobre el criterio $g_j(\cdot)$. Esta función debe tener la forma que indica la Figura 4.6.

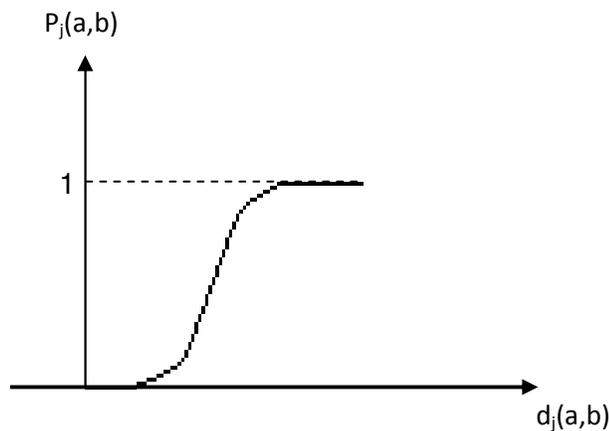


Figura 4.6. Función de preferencia donde $d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b)$ y $P_j(a,b)$ representa la función de preferencia entre los criterios a y b . Fuente: Brans y Mareschal, 2002

Las preferencias son iguales a cero cuando las desviaciones son negativas. Cuando los criterios deben ser minimizados, la función de preferencia debe invertirse:

$$P_j(a,b) = F_j[-d_j(a,b)] \tag{4.11}$$

Tanto el software PROMCALC, como el software DECISION LAB proponen seis tipos de funciones de preferencia, las cuales se muestran en la Tabla 4.2. En cada caso necesitan ser definidos 0, 1 ó 2 parámetros cuyo significado se enuncia a continuación:

- q es el límite de la indiferencia; es decir, es la desviación más grande que se considera insignificante por el tomador de decisiones.
- p es el límite estricto de la preferencia; es decir, es la desviación más pequeña que es considerada como suficiente para generar una preferencia amplia.
- s es un valor intermedio entre p y q; éste define el punto de inflexión de la función de preferencia. Se recomienda determinar primero q y p, para después obtener s como un valor intermedio entre estos parámetros.

Tabla 4.2. Funciones de preferencia, P, para el criterio j a través de $d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b)$. Fuente: Brans y Mareschal, 2002

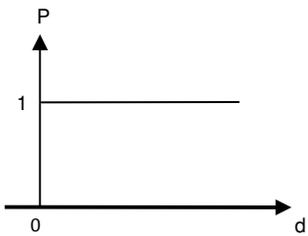
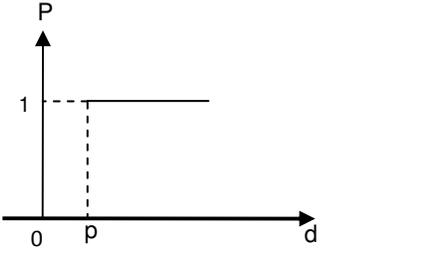
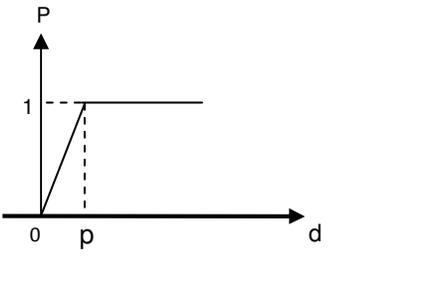
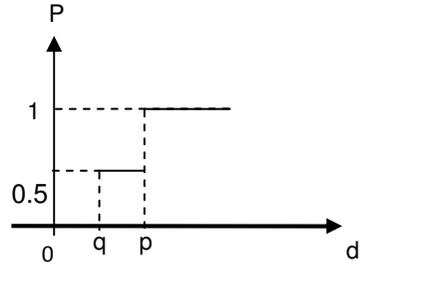
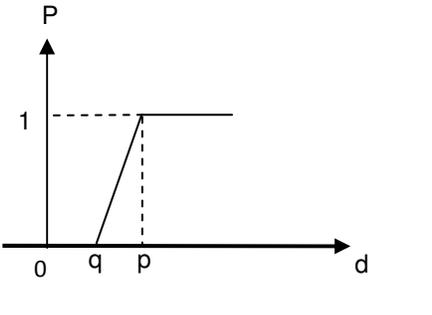
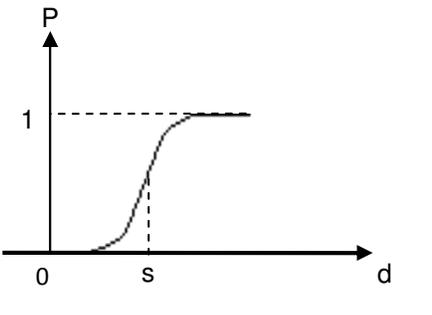
Tipo de función	Forma de función	Definición	Parámetros necesarios
1		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	--

Tabla 4.2. Continuación

2	 <p>A graph showing a step function P(d) on a coordinate system. The vertical axis is labeled P and has a tick mark at 1. The horizontal axis is labeled d and has a tick mark at p. The function is 0 for d ≤ p and 1 for d > p. A dashed vertical line is drawn at d = p, and a dashed horizontal line is drawn at P = 1.</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
3	 <p>A graph showing a function P(d) on a coordinate system. The vertical axis is labeled P and has a tick mark at 1. The horizontal axis is labeled d and has a tick mark at p. The function is 0 for d ≤ 0, increases linearly from (0,0) to (p,1), and is 1 for d > p. A dashed vertical line is drawn at d = p, and a dashed horizontal line is drawn at P = 1.</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
4	 <p>A graph showing a function P(d) on a coordinate system. The vertical axis is labeled P and has tick marks at 0.5 and 1. The horizontal axis is labeled d and has tick marks at q and p. The function is 0 for d ≤ q, jumps to 0.5 at d = q, jumps to 1 at d = p, and is 1 for d > p. Dashed vertical lines are drawn at d = q and d = p, and dashed horizontal lines are drawn at P = 0.5 and P = 1.</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
5	 <p>A graph showing a function P(d) on a coordinate system. The vertical axis is labeled P and has a tick mark at 1. The horizontal axis is labeled d and has tick marks at q and p. The function is 0 for d ≤ q, increases linearly from (q,0) to (p,1), and is 1 for d > p. A dashed vertical line is drawn at d = p, and a dashed horizontal line is drawn at P = 1.</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
6	 <p>A graph showing a smooth S-shaped curve P(d) on a coordinate system. The vertical axis is labeled P and has a tick mark at 1. The horizontal axis is labeled d and has a tick mark at s. The curve starts at 0 for d ≤ 0 and reaches 1 at d = s. A dashed vertical line is drawn at d = s, and a dashed horizontal line is drawn at P = 1.</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	s

Cuando la tabla de evaluación (Tabla 4.1) se haya construido, y los pesos w_j y los criterios generalizados $\{g_j(\cdot), P_j(a, b)\}$ estén definidos para $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,k$, el procedimiento PROMÉTHÉE puede ser aplicado.

4.3.2.1. Clasificación I y II de PROMÉTHÉE

Para explicar la clasificación I y II de PROMÉTHÉE es necesario definir dos conceptos, índices de preferencia agregados y flujos de categoría superior.

$$\begin{cases} \pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j \\ \pi(b, a) = \sum_{j=1}^k P_j(b, a)w_j \end{cases} \quad (4.12)$$

$\pi(a,b)$ expresa con qué grado a es preferente que b sobre todos los criterios y $\pi(b,a)$ expresa cómo b es preferente con respecto al criterio a. En muchos de los casos hay criterios en los cuales a es mejor que b y también hay criterios para los cuales b es mejor que a; por consiguiente, $\pi(a,b)$ y $\pi(b,a)$ son usualmente positivos.

Cuando $\pi(a,b)$ es prácticamente igual a 0 implica una frágil preferencia global de a sobre b y cuando $\pi(a,b)$ es prácticamente igual a 1 implica una fuerte preferencia global de a sobre b.

Una vez que $\pi(a,b)$ y $\pi(b,a)$ son calculados para cada par de opciones de A (A =conjunto de opciones) puede construirse una gráfica donde se representan los índices de preferencias agregadas de cada criterio. Esta representación es mostrada en la Figura 4.7.

Cada opción a es comparada contra (n-1) otras opciones del conjunto de opciones A, de donde se definen los dos siguientes flujos de categoría:

- Flujo de categoría positivo

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (4.13)$$

- Flujo de categoría negativo

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \tag{4.14}$$

donde x son todas las opciones diferentes de a. Estos flujos se esquematizan de acuerdo con la Figura 4.8.

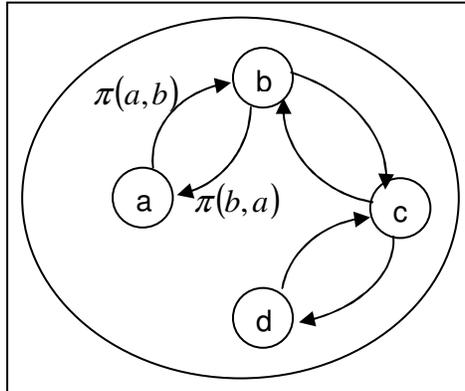


Figura 4.7. Gráfico de índices de preferencias agregadas donde a, b, c y d son opciones, $\pi(a,b)$ indica la preferencia de a sobre b y $\pi(b,a)$ indica la preferencia de b sobre a. Fuente: Brans y Mareschal, 2002

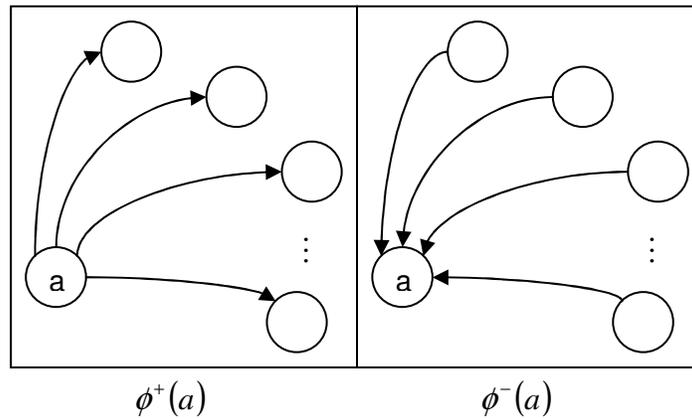


Figura 4.8. Flujos de categorías de PROMÉTHÉE donde a es una opción, $\phi^+(a)$ es el flujo de categoría dominante y $\phi^-(a)$ es el flujo de categoría inferior. Fuente: Brans y Mareschal, 2002

$\phi^+(a)$ expresa cómo una opción a es de categoría superior que todas las demás opciones. Éste es su poder, su carácter dominante.

$\phi^-(a)$ expresa cómo una opción a es de categoría inferior que todas las demás opciones. Ésta es su debilidad, su carácter de inferioridad. La Figura 4.9 muestra las relaciones de dominancia derivadas de estos flujos de categoría.

$$\left\{ \begin{array}{l} aP^I b \quad \text{si} \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi^+(a) > \phi^+(b) \quad \text{y} \quad \phi^-(a) < \phi^-(b), \text{ ó} \\ \phi^+(a) = \phi^+(b) \quad \text{y} \quad \phi^-(a) < \phi^-(b), \text{ ó} \\ \phi^+(a) > \phi^+(b) \quad \text{y} \quad \phi^-(a) = \phi^-(b) \end{array} \right. \\ \\ aI^I b \quad \text{si} \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi^+(a) = \phi^+(b) \quad \text{y} \quad \phi^-(a) = \phi^-(b) \end{array} \right. \\ \\ aR^I b \quad \text{si} \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi^+(a) > \phi^+(b) \quad \text{y} \quad \phi^-(a) > \phi^-(b), \text{ ó} \\ \phi^+(a) < \phi^+(b) \quad \text{y} \quad \phi^-(a) < \phi^-(b) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Figura 4.9. Relaciones de PROMÉTHÉE I (I) donde a y b son opciones, $\phi^+(a)$ es el flujo de categoría dominante, $\phi^-(a)$ es el flujo de categoría inferior, P^I , I^I y R^I indican preferencia, indiferencia e incomparabilidad, respectivamente. Fuente: Brans y Mareschal, 2002

Cuando se tiene $aP^I b$, hay un alto poder o dominancia de a asociado a una baja debilidad de a con respecto a b . La información de ambos flujos de categoría es consistente y puede, por lo tanto, ser considerada segura.

Cuando se tiene $aI^I b$, ambos flujos, positivo y negativo, son iguales.

Cuando se tiene $aR^I b$ la opción a es buena en algunos criterios donde b es débil, y de manera inversa b es bueno en algunos otros criterios donde a es débil. En tales casos la información que ambos flujos proveen no es consistente. PROMÉTHÉE I es prudente y no decide cuál opción es mejor en tales casos. El tomador de decisiones debe cargar con esta responsabilidad.

Por su parte, PROMÉTHÉE II se encarga de hacer una clasificación completa (P^{II} , I^{II}). El flujo neto de dominancia puede ser considerado como:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \tag{4.15}$$

Éste es el balance entre los flujos de dominancia positivo y negativo:

$$\begin{cases} aP''b & \text{si } \phi(a) > \phi(b) \\ aI''b & \text{si } \phi(a) = \phi(b) \end{cases} \quad (4.16)$$

Cuando PROMÉTHÉE II es considerado, todas las opciones son comparables, pero la información obtenida puede ser más discutible, debido a que mucha información se pierde por considerar la diferencia de la ecuación 4.15.

CAPÍTULO V

ESTUDIO DE CASO

En el presente capítulo se expone el estudio de caso a través del cual será aplicada la metodología descrita en el capítulo anterior. Se ha seleccionado como objeto principal de estudio, la bolsa desechable de polietileno (PE). Se presentan entonces, las diferentes opciones a analizar, incluidas obviamente y por motivos de comparación, las que se elaboran con PE.

Se presentan así, las principales características de todas las opciones. También se exponen las consideraciones y suposiciones realizadas para poder llevar a cabo el análisis propuesto.

5.1 Introducción

Una de las hipótesis de la presente tesis se basa en la idea de que las bolsas de plástico de uso individual no son eficientes desde el punto de vista del uso de la energía. Además de lo anterior, se tienen en cuenta también los problemas de la contaminación global y de la generación de residuos, dentro del ciclo de vida completo del producto: producción, uso y eliminación.

Durante la producción de estos artículos, los cuales por su carácter desechable, tienen un tiempo de uso breve, puede estar presente un desperdicio de recursos no renovables, así como la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Es importante también para lograr la sostenibilidad global a largo plazo, como se explicó ya en capítulos anteriores, que haya un uso eficiente de la energía, evitando así, el desperdicio de la energía, de las materias primas y de los recursos básicos.

Otra de las hipótesis plantea que existen diferentes materiales o bien, formas eficientes de utilización de los plásticos (e.g. reciclaje) para así obtener una vida útil más larga, ahorrar energía y evitar la contaminación, alcanzando entonces, el uso sostenible de los materiales, impulsados por la tecnología y el crecimiento económico, sin desperdiciar los recursos no renovables y la energía.

La metodología descrita en el capítulo anterior se aplicará en este caso, en el cual se analizará toda la cadena de producción, partiendo del gas natural húmedo o bien, del petróleo crudo hasta llegar a la producción de las bolsas de plástico ya sea de polietileno (PE) de alta o baja densidad (PEAD, PEBD, respectivamente) o de polipropileno (PP).

Del mismo modo, para materiales provenientes de recursos renovables con los que se pueden manufacturar materiales sustitutos, se considera el ciclo completo de su producción. Estos materiales son algodón y papel tipo Kraft, pudiendo ser otros igualmente de origen natural como el bambú o el yute, por citar algunos. Dado que la presente tesis no tiene como objetivo el estudio extensivo de posibles opciones para las bolsas de polietileno, se consideran al papel y al algodón como aquellos materiales de origen vegetal, que son más susceptibles de utilizarse para el fin de manufacturar bolsas para el transporte de mercancías.

Siguiendo paso a paso la metodología ya descrita anteriormente, enseguida se realiza el análisis de exergía. Por medio de los resultados obtenidos de este análisis, se compara el PE con otros materiales para identificar aquel que haga un menor consumo de energía y de recursos no

renovables. Los procesos de producción para cada una de las opciones aquí propuestas se describen en el Apéndice 1.

Para conocer qué material (incluyendo el PE) tiene un mejor desempeño en cuanto a los criterios de interés, de jerarquizar y ordenar las diferentes opciones, se utilizan métodos multicriterio (*Vincke, 1992*) (PROMÉTHÉE-GAIA), teniendo en cuenta diversos criterios: mayor eficiencia de exergía, menor consumo de recursos renovables durante su ciclo de vida, un mejor rendimiento energético en su ciclo de vida completo, un menor número de emisiones de gases de efecto invernadero y un mayor valor del producto.

5.2 Definición del problema

El consumo mundial de polietileno para el 2006 corresponde a 63.7 millones de toneladas. De éstas, alrededor de 55% fueron utilizadas para la fabricación de bolsas desechables para el comercio. En México se ha visto una tendencia creciente en la utilización de polietileno como película para manufacturar bolsas, como se observa en la Figura 5.1 (*CEP, 2010*).

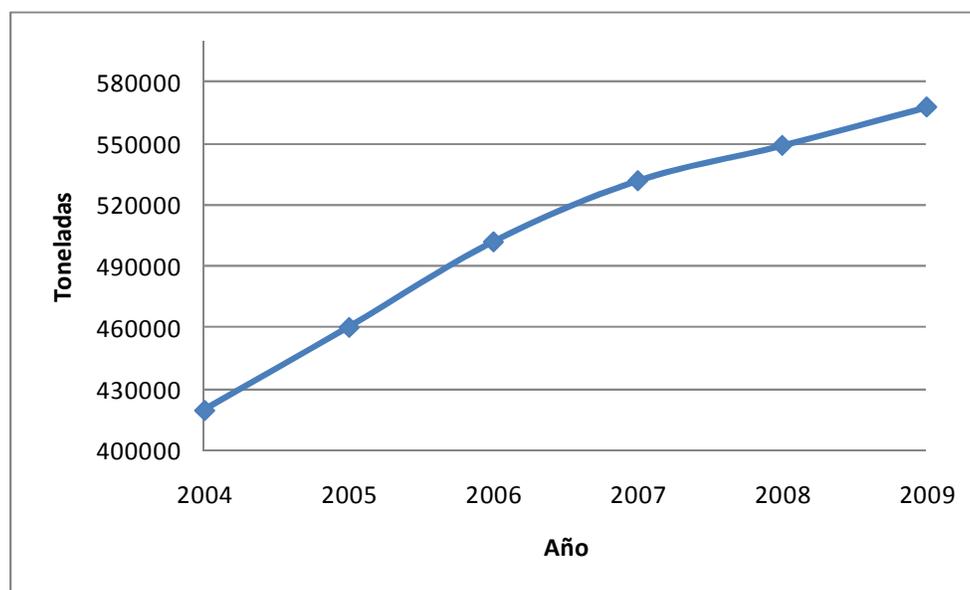


Figura 5.1. Consumo de bolsas de polietileno, PE, en México. Fuente: *Elaboración propia con datos del CEP, 2010*

Considerando el consumo de polietileno para la manufactura de bolsas en el año 2009, que corresponde a 567,680 toneladas, se fabricaron aproximadamente 101,371 millones de bolsas (con las características de la Tabla 5.1) tan sólo en ese año.

Tabla 5.1. Principales características de las bolsas analizadas. *Fuente: Chaffee y Yaros, 2007; James y Grant, 2003*

Composición	DESECHABLES			REUTILIZABLES	
	PE (grado película)	PE + prodegradante	Papel tipo Kraft (sin blanquear)	PP (fibra)	Algodón (sin blanquear)
Tamaño (cm)	25+15x50	25+15X50	35+10x40	37+10x39	31+21X33.5
Capacidad de carga (kg)	3	3	4	9	10
Masa (g)	5.6	6	42.6	60	90
Unidad funcional (u.f.)	900 bolsas	900 bolsas	675 bolsas	1 bolsa	1 bolsa
Masa u.f. (kg)	5.04	5.4	28.755	0.06	0.09
Uso esperado	1 sola vez	1 sola vez	1 sola vez	300 veces	300 veces

PE = polietileno, PE + prodegradante = polietileno con aditivo que induce la degradación, PP = polipropileno, u.f. = unidad funcional

El precio de venta promedio de las bolsas de polietileno es de \$28 MXN/kg; mientras que el costo de producción de estas bolsas es de alrededor de \$4 MXN/kg (CEP, 2010). Se tiene por lo tanto, una ganancia o margen bruto correspondiente a \$24 MXN/kg de bolsa; que es la diferencia entre el precio de venta y el costo de producción.

Debido a su baja masa, estas bolsas tienden a esparcirse con facilidad, provocando así contaminación y problemas de asfixia en los animales al enredarse en ellas. Es por lo anterior que se busca encontrar una opción con mejor desempeño desde el punto de vista ecológico y

medioambiental, pero analizando además que en el ciclo completo de vida del producto se cumplan los criterios deseados, como un menor consumo de energía y recursos, así como una menor generación de emisiones.

5.3 Definición del objetivo y del alcance

El objetivo de este estudio, como ya se mencionó al inicio, es analizar las pérdidas de exergía durante la producción de los materiales utilizados para la fabricación de bolsas desechables (bolsas de compras). Al decir bolsas de compras, se hace referencia a aquellas bolsas que se entregan en el supermercado y/o en los comercios para el transporte de la mercancía de la tienda a donde el consumidor desee.

La unidad funcional seleccionada en este estudio de caso es un uso repetido de 300 veces para las bolsas reutilizables, algodón y polipropileno, que es el promedio de vida de las mismas (*James y Grant, 2003*), mientras que para las demás bolsas se considera que se utilizan una sola vez.

Debido a la capacidad de carga de la bolsa de plástico, se define una unidad funcional como el uso de 900 bolsas de polietileno de acuerdo con las especificaciones del fabricante (*Chaffee y Yaros, 2007*) y 675 bolsas de papel, que se calcularon como el número de bolsas de un solo uso que equivalen a la utilización de una bolsa reutilizable (*Chaffee y Yaros, 2007*). Esta base de cálculo se utilizó sistemáticamente para los análisis de materia, energía y exergía del ciclo de vida de las diferentes opciones.

5.4 Materiales

Se analizaron cinco tipos de bolsas de supermercado, tres de ellas desechables: la bolsa de plástico de uso común hecha de polietileno ya sea de alta o de baja densidad, una bolsa de polietileno que contiene un agente prodegradante y bolsas de papel tipo Kraft. Las otras dos son reutilizables: una bolsa de fibra hecha de polipropileno y una bolsa de algodón. Para el análisis de exergía, los cálculos se basan en la información de la Tabla 5.1, que muestra las principales características relacionadas con cada tipo de bolsa y la unidad funcional ya definida en la sección anterior.

Aunque se hubiese podido investigar el uso de otros materiales naturales de los que hace mucho tiempo se utilizaban en México, tales como el henequén y el ixtle, se considera en este estudio que su producción masiva es muy difícil de llevar a cabo, debido a que la ocupación agrícola y los recursos en agua, en fertilizante y en mano de obra de tales materiales, tendría que sustituir a los cultivos que actualmente son indispensables, principalmente el maíz. Por lo tanto, no fueron considerados como posibles opciones. En otros países, se ha informado que se utilizan otros tipos de fibras naturales tales como el bambú y la cáscara del arroz pero, igualmente, su manufactura en gran escala en México no parece ser factible, por las mismas razones apuntadas arriba. Algunos de estos materiales hubieran podido importarse para manufacturar las bolsas, pero entonces su comparación energética y de utilización como recurso no hubiera podido llevarse a cabo para todo el ciclo de vida, además de que el uso de divisas en productos que no son necesarios para la economía por haber producciones nacionales de los bienes ya citados en el párrafo anterior.

El polietileno no es biodegradable, principalmente porque tiene una masa molecular elevada y sus grandes moléculas no pueden ser degradadas por los microorganismos con facilidad.

Por otra parte, los aditivos pro-oxidantes (prodegradantes) son complejos de iones metálicos de transición, y se adicionan al polietileno en la forma de estearato o de otro tipo orgánico de ligandos complejos. Los estearatos de hierro (Fe^{3+}), manganeso (Mn^{2+}) y cobalto (Co^{2+}) son los prooxidantes más utilizados (Ojeda et al., 2009). El polietileno que se ha oxidado por medio de la presencia de aditivos pro-oxidantes es más susceptible al ataque microbiano que la película de polietileno inicial (sin aditivo) debido al incremento en la hidrofilia¹⁰ y la presencia de fragmentos de baja masa molecular (Ojeda et al., 2009).

5.5 Origen de los datos

El análisis de ciclo de vida, ACV, se lleva a cabo con la ayuda del paquete de cómputo denominado 'SimaPro 7.1'. También se utilizó la base de datos del simulador de procesos 'Aspen Plus' para obtener información termoquímica. Se consultaron así mismo, enciclopedias de tecnología

¹⁰ (Del griego hidro, agua y philia, amistad o afinidad). En fisicoquímica, propiedad que tienen las moléculas de atraer y conservar el agua, a través de los puentes de hidrógeno

química (Kirk y Othmer, 2004) e informes de evaluaciones del ciclo de vida disponibles para el público. Los informes de plásticos de Europa elaborados por Boustead Consulting también fueron revisados (Chaffee y Yaros, 2007). En el caso de la cadena de producción de los polietilenos y del polipropileno, la información sobre las materias primas, los productos y los servicios, se obtuvo del reporte del Programa Económico de Proceso (PEP, 1998).

5.6 Consideraciones

Se encontró que la composición del algodón (Kirk y Othmer, 2004) es 94% celulosa, proteínas 1.3% (% N x 6.25) y 1.2% de sustancias pécticas, principalmente. Por lo tanto, para conocer el contenido de exergía del algodón, la relación del poder calorífico neto (PCN) a la exergía química de la celulosa fue la que se utilizó como equivalente al algodón.

El aditivo prodegradante fue modelado como ácido esteárico y una pequeña cantidad de manganeso (Mn) para representar la presencia de estearato de manganeso. Lo anterior debido a la poca disponibilidad de información sobre la producción de ácido esteárico y estearato de manganeso. Se consideró que la bolsa contiene 97% de PE y 3% de aditivo.

En el caso del cultivo de algodón, los abonos tomados en cuenta son urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), pentóxido de potasio K_2O_5 y pentóxido de fósforo (P_2O_5).

5.7 Resultados

En este apartado se exponen los resultados obtenidos para cada una de las opciones, con cada uno de los criterios a evaluar. Posteriormente, se muestra la jerarquización obtenida al aplicar el método multicriterio PROMÉTHÉE-GAIA a estos resultados.

La serie de cálculos para obtener cada uno de los parámetros que aparecen en la metodología descrita en el presente capítulo V, se encuentran detallados en el Apéndice 2.

Aplicando la metodología y tomando los cálculos del Apéndice 2, se obtuvieron los siguientes resultados para el análisis de exergía para las diferentes opciones propuestas, tal y como se muestran en las Tablas 5.2 a la 5.8.

De los balances de materia y energía que se encuentran calculados y se presentan en detalle en el Apéndice 2, se conocen ahora todos los datos para realizar los balances de exergía. Con esto se obtiene que la irreversibilidad para la cadena de producción de una tonelada de PEBD es de 377.15 MJ/u.f., como se resume en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Análisis de exergía para el polietileno de baja densidad, PEBD, partiendo de gas natural húmedo

Proceso	Ex entrada (MJ/ton)	Ex salida (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/u.f.)
CPG con la estructura de Nuevo Pemex	567661.8685	520179.9127	47481.95583	239.3090574
Etileno a partir de etano	89141.438	72994.28902	17115.97793	81.3816309
PEBD, reactor tubular	59855.656	48155.63137	11700.02463	56.45888237
TOTAL	716658.9625	641329.8331	76297.95839	377.1495706

CPG = Centro Procesador de Gas (México), Ex = exergía, u.f. = unidad funcional

Y si se obtuviera el PEBD con etileno a partir de una refinería, el balance de exergía se resume en la Tabla 5.3 y, nuevamente, los cálculos se encuentran en el Apéndice 2.

Tabla 5.3. Análisis de exergía para el polietileno de baja densidad, PEBD, partiendo de petróleo crudo

Proceso	Ex entrada (MJ/ton)	Ex salida (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/u.f.)
Refinería con la estructura básica de Ciudad Madero, México	252595.9436	208005.7293	44590.21425	224.7346798
PEBD, reactor tubular	59855.656	48155.63137	11700.02463	56.45888237
TOTAL	312451.5996	256161.3607	56290.23888	281.1935622

Ex = exergía, u.f. = unidad funcional

Enseguida se realizan los mismos cálculos par el caso de la fabricación de polietileno de alta densidad a partir de gas natural (ver Tabla 5.4).

Tabla 5.4. Análisis de exergía para el polietileno de alta densidad, PEAD, partiendo de gas natural húmedo

Proceso	Ex entrada (MJ/ton)	Ex salida (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/u.f.)
CPG con la estructura de Nuevo Pemex	548918.3133	503004.156	45914.15724	231.4073525
Etileno a partir de etano	86198.08864	70584.10023	16004.33812	78.69450158
PEAD en suspensión en fase líquida	55194.41384	46914.64295	8279.770887	38.16352478
TOTAL	690310.8158	620502.8992	70198.26625	348.2653789

CPG = Centro Procesador de Gas (México), Ex = exergía, u.f. = unidad funcional

Y, obteniendo el etileno a partir de una refinería y, posteriormente, el PEAD, se obtienen las cifras que se encuentran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Análisis de exergía para el polietileno de alta densidad, PEAD, partiendo de petróleo crudo

Proceso	Ex entrada (MJ/ton)	Ex salida (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/u.f.)
Refinería con la estructura básica de Ciudad Madero, México	244255.5115	201137.6156	43117.89586	217.3141951
Isomerización del butano	6.346407002	5.288260014	1.058146988	0.005333061
PEAD en suspensión en fase líquida	55194.41384	46914.64295	8279.770887	38.16352478
TOTAL	299456.2717	248057.5468	51397.68959	255.477835

Ex = exergía, u.f. = unidad funcional

En el caso del polipropileno, se toma como inicio de la cadena una configuración tecnológica como la de la refinería de Ciudad Madero, México, por ser la refinería con la mayor producción de propileno de México. Los resultados para el balance de exergía se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Análisis de exergía para el polipropileno, PP

Proceso	Ex entrada (MJ/ton)	Ex salida (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/u.f.)
Refinería con una configuración tecnológica como la de Ciudad Madero, México	364810.5	300411.2934	64399.2066	3.863952396
PP, polimerización en suspensión	59492.54048	46801.29557	12691.2449	0.72581816
TOTAL	424303.0405	347212.589	77090.4515	4.589770556

Ex = exergía, u.f. = unidad funcional

En el caso del algodón y el papel tipo Kraft, ambos sin blanquear, se muestran los datos como un solo proceso, según se observa en las Tablas 5.7 y 5.8, respectivamente.

Tabla 5.7. Análisis de exergía para algodón sin blanquear

Proceso	Ex entrada (MJ/ton)	Ex salida (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/u.f.)
Algodón sin blanquear	3272124.941	19527.4	3252597.541	292.6398929

Ex = exergía, u.f. = unidad funcional

Tabla 5.8. Análisis de exergía para papel tipo Kraft sin blanquear

Proceso	Ex entrada (MJ/ton)	Ex salida (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/ton)	Irreversibilidad (MJ/u.f.)
Papel tipo Kraft sin blanquear	140987.2043	19527.4	121459.8043	3486.655285

Ex = exergía, u.f. = unidad funcional

Como criterio adicional de selección que indicara la importancia económica de los materiales bajo competencia se utilizó el ‘valor del producto’, el cual se calculó para cada uno de los materiales propuestos.

El valor del producto se define como la suma del costo total de producción más una rentabilidad sobre la inversión a realizarse, esta última denominada ‘ROI’, retorno de la inversión, por sus siglas en inglés.

Para ello, se necesita calcular primero el costo total unitario de producción del producto de cada tecnología. Esto se consigue dividiendo el costo total entre la capacidad de la planta, como lo indica la ecuación 5.1:

$$\text{Costo total unitario} = \frac{\text{Costo total}}{\text{Capacidad de la planta}} \quad (5.1)$$

mientras que el costo total se calcula con la ecuación 5.2:

$$\begin{aligned} \text{Costo total del producto} &= \text{costos de materia prima} + \text{costos de servicios} \\ &+ \text{costos de mantenimiento} \\ &+ \text{costos de la mano de obra de operación y de mantenimiento} \\ &+ \text{costos indirectos} + \text{depreciación} \\ &+ \text{gastos de investigación y desarrollo} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Nota: no se incluyen impuestos.

Para calcular la ganancia, se emplea la ecuación 5.3:

$$\text{Ganancia} = \text{Inversión} (\%ROI) \quad (5.3)$$

donde %ROI es el porcentaje de retorno sobre la inversión, es decir, la rentabilidad que se desea obtener por cada US\$ invertido. En el presente trabajo, al igual que en la literatura (PEP, 1998), se emplea un ROI del 25%. La ganancia así obtenida se divide entre la capacidad de la planta para obtener una ganancia unitaria en US\$/ton.

Una vez que ya se tienen los costos unitarios totales de producción y la ganancia unitaria, el valor del producto, se puede calcular mediante la ecuación 5.4:

$$\text{Valor del producto} = \text{Costo total unitario} + \text{ganancia unitaria} \quad (5.4)$$

Por último, para obtener el valor del producto total de cada cadena o ruta tecnológica se debe multiplicar por los Coeficientes Insumo-Producto (CIP) correspondientes a cada tecnología que forme parte de su ruta tecnológica de producción. Estos coeficientes fueron obtenidos del reporte del Process Economic Program (PEP, 1998).

Una vez obtenidos los resultados, se utilizan los métodos multicriterio para jerarquizar y ordenar las opciones y conocer así aquella que cumpla mejor los criterios propuestos.

En la Tabla 5.9 se presentan los resultados finales para cada uno de los criterios a evaluar en cada una de las opciones. No obstante, la explicación desglosada para cada uno de los criterios y de cada material se encuentra en el Apéndice 2.

Tabla 5.9. Resultados para cada uno de los criterios de cada opción a evaluar

MATERIAL	Balance materia (bpce/u.f.)	Balance energía (bpce/u.f.)	Irreversibilidad (bpce/u.f.)	Emisiones (g CO ₂ /u.f.)	Valor del producto (US\$/u.f.)
PEBD (GNH)	0.50448321	0.076593384	0.062751062	38.37149682	9.50573296
PEBD (refinería)	0.204355126	0.028681321	0.046785668	22.83884315	19.46158508
PEAD (GNH)	0.487825745	0.072323214	0.05794524	31.32593948	8.120804985
PEAD (refinería)	0.197607551	0.02600327	0.042507023	16.30615645	18.07441152
PP	0.003513895	0.000462744	0.000763657	0.249721121	0.243100784
Algodón	9.306E-07	0.00089547	0.048705757	0.38385	0.247271659
Papel tipo Kraft	6.38361E-05	0.215294705	0.580118179	81.95175	85.58363946
OXO-PEBD (GNH)	0.524302193	0.079632403	0.070954934	43.00878849	10.20317247
OXO-PEBD (refinería)	0.212383363	0.029838081	0.053517983	26.86592342	20.55014735
OXO-PEAD (GNH)	0.506990328	0.075194477	0.065638984	35.68644138	8.763836609
OXO-PEAD (refinería)	0.205370705	0.02705482	0.049254072	20.07659545	19.10847768

PEBD (GNH)= polietileno de baja densidad proveniente de gas natural húmedo, PEBD (refinería)= polietileno de baja densidad proveniente de petróleo crudo, PEAD (GNH)= polietileno de alta densidad proveniente de gas natural húmedo, PEAD (refinería)= polietileno de alta densidad proveniente de petróleo crudo, PP= polipropileno, OXO-PEBD (GNH)= polietileno de baja densidad (con agente degradante) proveniente de gas natural húmedo, OXO-PEBD (refinería)= polietileno de baja densidad (con agente degradante) proveniente de petróleo crudo, OXO-PEAD (GNH)= polietileno de alta densidad (con agente degradante) proveniente de gas natural húmedo, OXO-PEAD (refinería)= polietileno de alta densidad (con agente degradante) proveniente de petróleo crudo, bpce= barriles de energético equivalente a petróleo crudo, u.f.= unidad funcional, US\$= dólares de EEUU

El primer criterio está relacionado con el balance de materia de cada una de las opciones propuestas. Este criterio se intentará minimizar puesto que habiéndolo expresado en barriles de petróleo crudo, se requeriría utilizar la menor cantidad de este recurso no-renovable a lo largo de

las cadenas completas de producción. El algodón es el material que menos cantidad de petróleo equivalente utiliza y el oxo-polietileno de baja densidad es el que más consume.

El segundo criterio es la cantidad real de energía consumida en las cadenas completas de producción, expresada igualmente en barriles de petróleo crudo equivalente por unidad funcional. El criterio deberá minimizarse, dado que cada unidad de energía corresponde también a una cantidad dada de petróleo equivalente, utilizando el poder calorífico promedio de éste.

El tercer criterio corresponde a las irreversibilidades de cada material, nuevamente expresadas en barriles de petróleo equivalente. Como ya quedó definido, la irreversibilidad, desde el punto de vista del balance de exergía, representa la cantidad de energía que no puede utilizarse de acuerdo con el proceso de producción respectivo y las características fisicoquímicas de cada material utilizado, incluyendo las respectivas emisiones a la atmósfera debidas a la producción del material insumido y producido en su respectiva cadena de producción.

En la misma tabla, se observan las emisiones de CO₂, sustancia responsable de los gases de efecto invernadero y que, obviamente, con esta variable tratará de encontrarse la opción que dé el valor mínimo de estas emisiones.

La última columna de la tabla corresponde al valor del producto, tal como ha quedado definido anteriormente. Como el valor del producto es una forma de resumir la ganancia y los costos de producción, se le considera una variable “próxima” al valor agregado, el cual se desea maximizar para obtener el mejor desempeño económico correspondiente a cada opción. Este criterio se encuentra expresado en US\$/u.f.

Para poder jerarquizar las 11 opciones propuestas, se utiliza el programa de cómputo Decision Lab, especializado para resolver problemas de múltiples criterios con el método PROMÉTHÉE-GAIA.

Con ello se pueden jerarquizar las opciones, presentando en los primeros lugares en orden descendente (“ranking”) a aquel o aquellos materiales que muestren un mejor desempeño considerando todos los criterios del uso de bolsas individuales para transportar mercancías en el comercio.

Haciendo uso de la información de la Tabla 5.9 se introduce la información a Decision Lab, el cual, considerando una ponderación dada para cada uno de los criterios evaluados, arroja como resultado un ordenamiento de las opciones de acuerdo con los resultados.

La función de preferencia (éstas fueron mostradas en el Capítulo IV), que se utilizará para cada uno de los criterios es la de tipo 1: usual. Esto es debido a que entre los datos de cada opción para un criterio dado, se observa que uno de ellos sobresale de manera significativa de los demás considerando que 4 de los criterios se intentan minimizar y uno se desea maximizar.

La jerarquización obtenida para los resultados relacionados con la unidad funcional se muestra en la Figura 5.2 utilizando la metodología de criterios múltiples “PROMÉTHÉE-GAIA”.

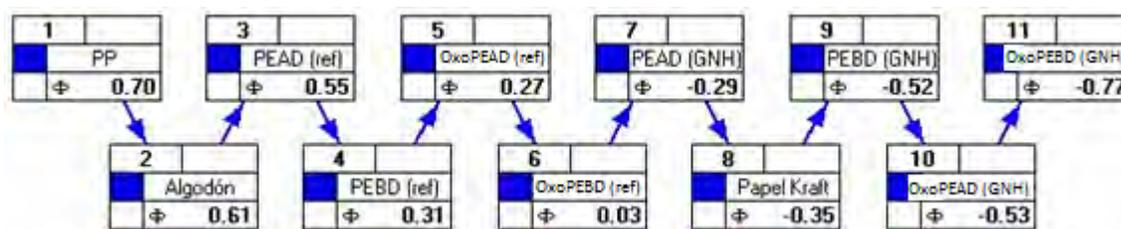


Figura 5.2. Orden jerárquico (“ranking”) completo para las opciones propuestas [PEBD (GNH)= polietileno de baja densidad proveniente de gas natural húmedo, PEBD (ref)= polietileno de baja densidad proveniente de petróleo crudo, PEAD (GNH)= polietileno de alta densidad proveniente de gas natural húmedo, PEAD (ref)= polietileno de alta densidad proveniente de petróleo crudo, PP= polipropileno, Oxo-PEBD (GNH)= polietileno de baja densidad (con agente degradante) proveniente de gas natural húmedo, Oxo-PEBD (ref)= polietileno de baja densidad (con agente degradante) proveniente de petróleo crudo, Oxo-PEAD (GNH)= polietileno de alta densidad (con agente degradante) proveniente de gas natural húmedo, Oxo-PEAD (ref)= polietileno de alta densidad (con agente degradante) proveniente de petróleo crudo]

Este software genera también un plano llamado plano GAIA, el cual es una proyección ortogonal de los diferentes criterios y las diferentes opciones que se encuentran en comparación. En este plano se aprecian de manera gráfica, los conflictos que se tienen entre los criterios y la posición de cada opción. Para la proyección ortogonal de los resultados obtenidos a través de PROMÉTHÉE se utilizó el análisis multivariante. La línea de decisión (dibujada en rojo en el plano GAIA) muestra,

de acuerdo con los “pesos”, la posición de preferencia del tomador de decisiones. Las opciones que se encuentran más cercanas a esta línea, son las que poseen un mejor desempeño.

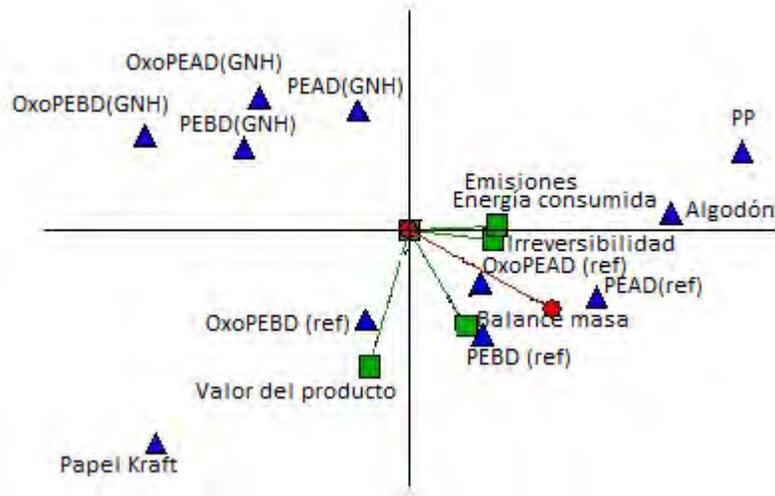


Figura 5.3. Plano GAIA para el caso de las bolsas para transporte de mercancías

Como se observa, los polímeros provenientes del gas natural se encuentran aislados de los demás materiales, por lo que se realizó otra comparación donde se separan del resto, quedando de la forma que se muestra en las Figuras 5.4 a 5.7.

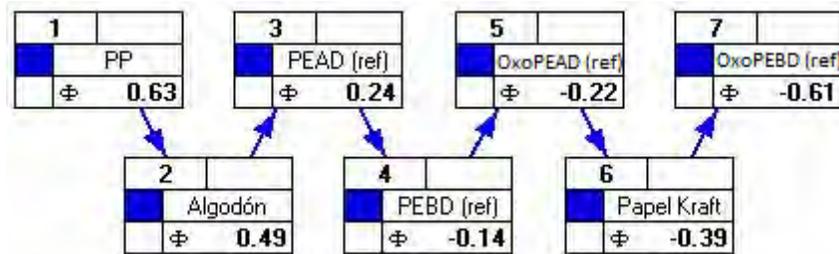


Figura 5.4. Orden jerárquico (“ranking”) completo, sin aquellas opciones provenientes del gas natural húmedo [PEBD (ref)= polietileno de baja densidad proveniente de petróleo crudo, PEAD (ref)= polietileno de alta densidad proveniente de petróleo crudo, PP= polipropileno, Oxo-PEBD (ref)= polietileno de baja densidad (con agente degradante) proveniente de petróleo crudo, Oxo-PEAD (ref)= polietileno de alta densidad (con agente degradante) proveniente de petróleo crudo]

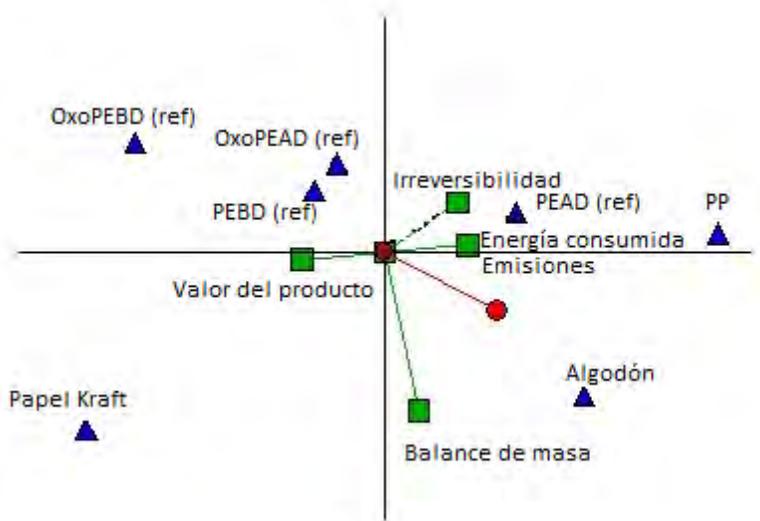


Figura 5.5. Plano GAIA para las opciones, excluyendo aquellas provenientes del gas natural húmedo

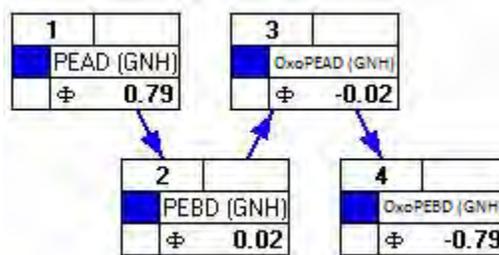


Figura 5.6. Orden jerárquico (“ranking”) completo para las opciones provenientes del gas natural húmedo [PEBD (GNH)= polietileno de baja densidad proveniente de gas natural húmedo, PEAD (GNH)= polietileno de alta densidad proveniente de gas natural húmedo, Oxo-PEBD (GNH)= polietileno de baja densidad (con agente degradante) proveniente de gas natural húmedo, Oxo-PEAD (GNH)= polietileno de alta densidad (con agente degradante) proveniente de gas natural húmedo]

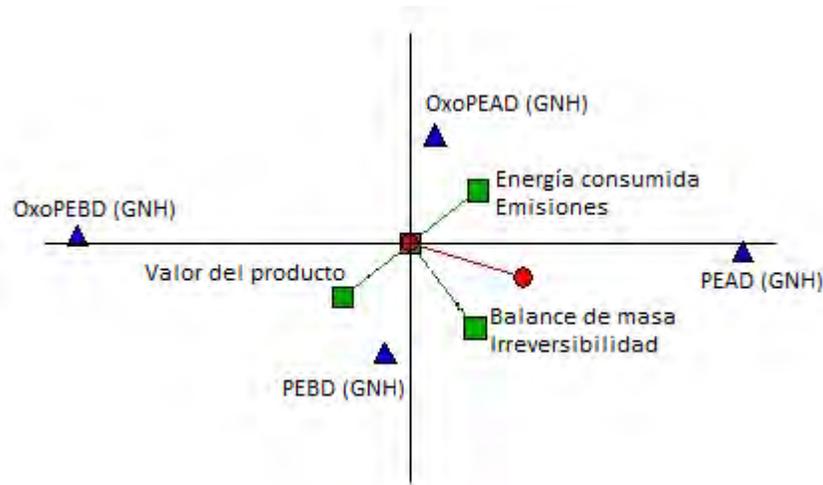


Figura 5.7. Plano GAIA para las opciones provenientes del gas natural húmedo

Los resultados anteriores están todos en relación con la unidad funcional pero se podrían también comparar en función de las toneladas de cada uno de los materiales, aunque estos resultados no mostrarían de manera fiel la sustitución de un tipo de bolsa por otra constituida de diferentes materiales, considerando la capacidad de sustitución de cada material reflejado a través de la definición de 'unidad funcional' (u.f.). La forma de la función de preferencia se determinó de acuerdo con el comportamiento de los datos para cada criterio. Para el primer criterio, que corresponde al consumo de barriles de petróleo (balance de masa), la función es de tipo 1: usual. El consumo de energía mostró una función de preferencia como la 3: en forma "V". El criterio que corresponde a las irreversibilidades es de tipo 5: "V" con indiferencia. Para el cuarto criterio, las emisiones, la función es de tipo 3: en forma de "V", al igual que el último criterio referente al valor del producto (Figuras 5.8 y 5.9).

Comparando estos resultados con los obtenidos para una unidad funcional se observa que la jerarquización cambia, esto es debido a la unidad funcional. Por ejemplo, el polipropileno ocupa el lugar número 6 en desempeño, mientras que el algodón tiene la posición 7. Cuando la comparación se realiza por tonelada de material, al relacionar la información a la unidad funcional,

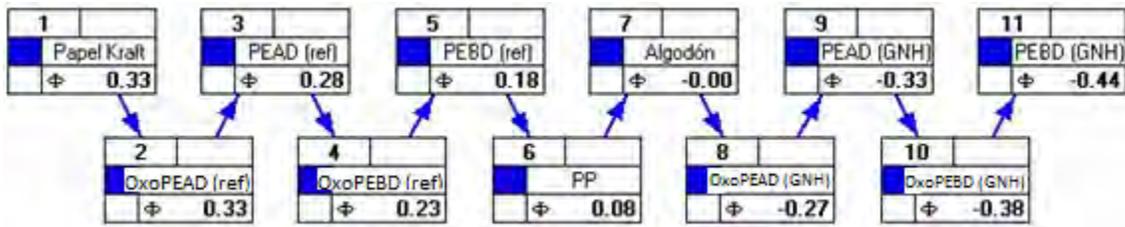


Figura 5.8. Orden jerárquico (“ranking”) completo, en relación con las toneladas de material [PEBD (GNH)= polietileno de baja densidad proveniente de gas natural húmedo, PEBD (ref)= polietileno de baja densidad proveniente de petróleo crudo, PEAD (GNH)= polietileno de alta densidad proveniente de gas natural húmedo, PEAD (ref)= polietileno de alta densidad proveniente de petróleo crudo, PP= polipropileno, Oxo-PEBD (GNH)= polietileno de baja densidad (con agente degradante) proveniente de gas natural húmedo, Oxo-PEBD (ref)= polietileno de baja densidad (con agente degradante) proveniente de petróleo crudo, Oxo-PEAD (GNH)= polietileno de alta densidad (con agente degradante) proveniente de gas natural húmedo, Oxo-PEAD (ref)= polietileno de alta densidad (con agente degradante) proveniente de petróleo crudo]

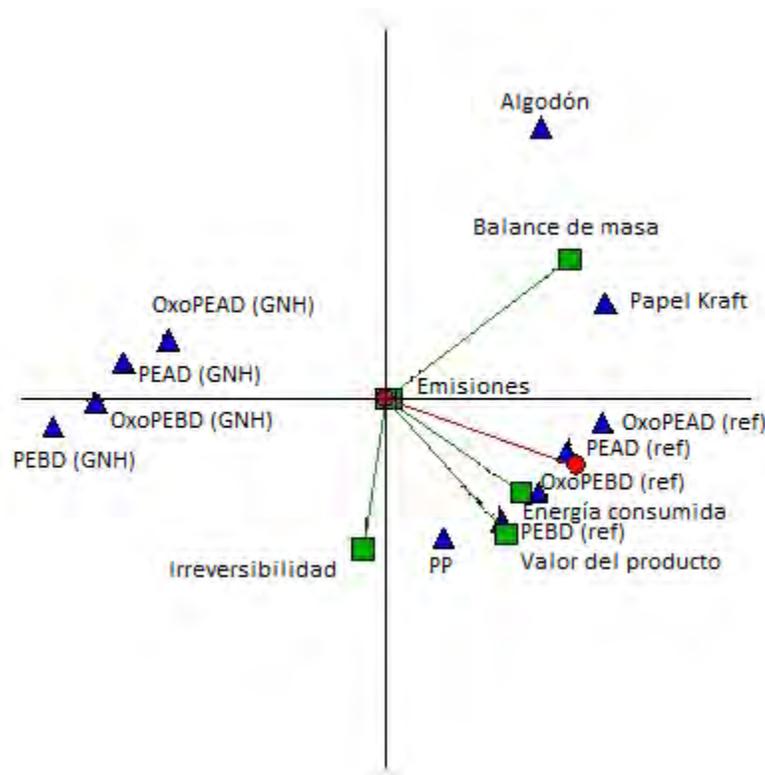


Figura 5.9. Plano GAIA, en relación con las toneladas de material

el polipropileno resulta como el mejor material y el algodón como la segunda mejor opción. Estos cambios en la posición se deben a que al utilizar una bolsa “reusable”, ya sea de polipropileno o de algodón, se deja de incurrir aproximadamente en la utilización de 900 bolsas desechables.

Por su parte, el papel tipo Kraft es la mejor opción cuando se refiere a tonelada de material, no así en el caso de la unidad funcional, donde ocupa la posición 8. La razón de lo anterior es que la cantidad de material que se requiere para obtener una bolsa desechable de papel es mayor a la requerida para bolsas desechables elaboradas con polipropileno.

En ambas situaciones, cuando la materia prima en la cadena completa de producción es el gas natural húmedo, el desempeño comparado con los demás materiales es bajo.

De acuerdo con los resultados obtenidos para la unidad funcional, se realizaron los diagramas donde se observa la reducción de exergía en las tres opciones con el mejor desempeño. La Figura 5.10 muestra el diagrama de exergía para la mejor opción para la fabricación de bolsas para el transporte de mercancías: el polipropileno.

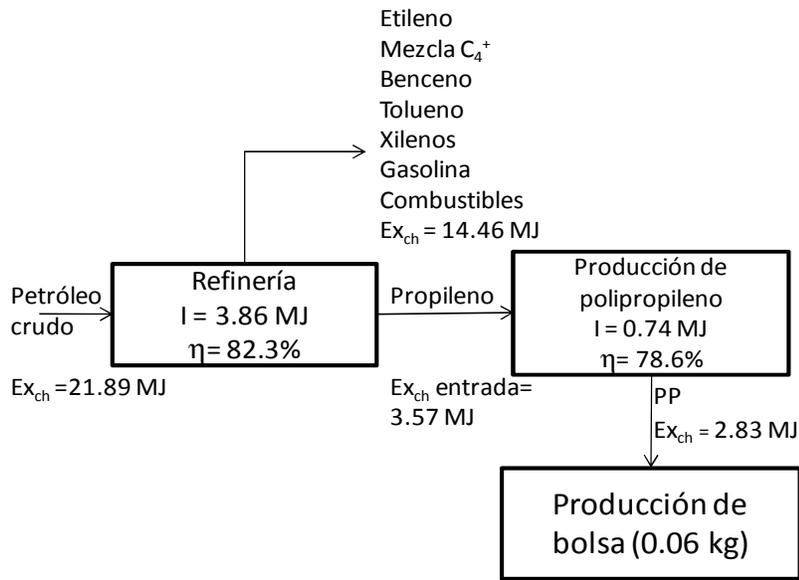


Figura 5.10. Diagrama de exergía para el ciclo de vida de una bolsa de polipropileno

La Figura 5.11 muestra el diagrama de exergía para el caso de la bolsa fabricada con algodón.

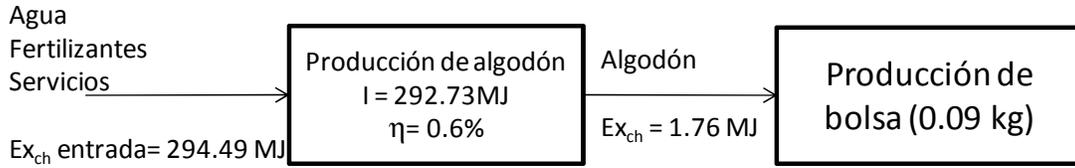


Figura 5.11. Diagrama de exergía para el ciclo de vida de una bolsa de algodón

En la Figura 5.12 se observa el diagrama de exergía correspondiente a la tercera mejor opción en cuanto a material para la fabricación de bolsas para el transporte de mercancías: el polietileno de alta densidad fabricado a partir de petróleo crudo. En este caso las bolsas son desechables y como ya se expuso con anterioridad 900 de éstas equivalen a una bolsa reutilizable de polipropileno o algodón.

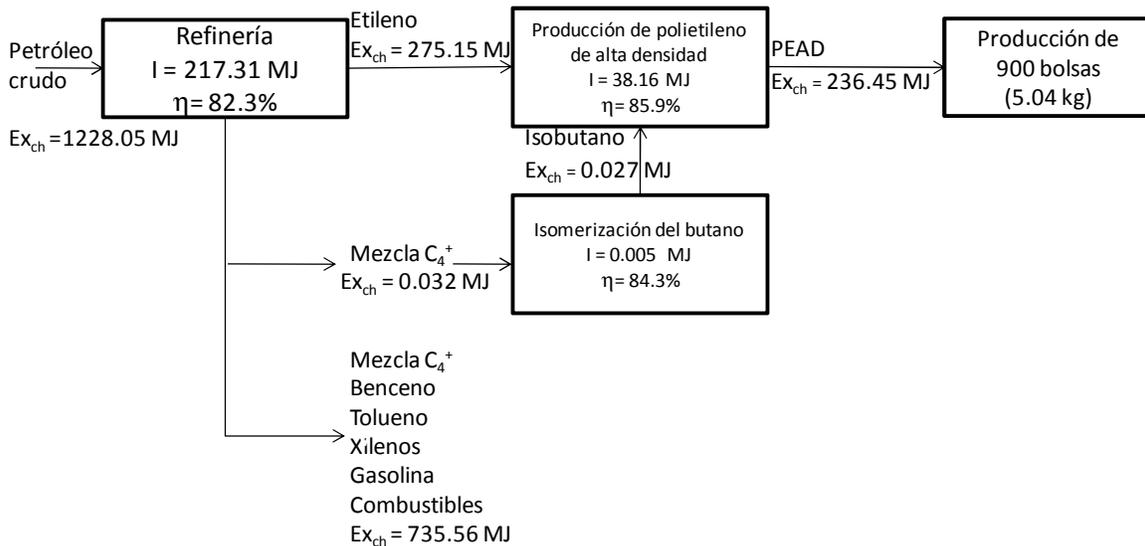


Figura 5.12. Diagrama de exergía para el ciclo de vida de 900 bolsas de polietileno de alta densidad a partir de petróleo crudo

Para todos los análisis, la distribución de “pesos” para cada criterio, considerando la metodología multicriterio ya descrita en el Capítulo IV, se propone conforme a la Tabla 5.10.

Tabla 5.10. Distribución de “pesos” para los criterios

Criterio	%
Consumo de barriles de petróleo	24
Consumo de energía	25
Irreversibilidad	18
Emisiones de CO ₂	22
Valor del producto	10

Debe hacerse notar que se realizaron varios cálculos con diferentes “pesos” para cada criterio, cuya resultante es el vector “pi” que se puede observar en el plano GAIA ya descrito. Para que este vector dividiera en forma equitativa cada uno de los criterios, la distribución que se presenta en la Tabla 5.10 fue aquella que logró ese objetivo.

CONCLUSIONES

Considerando que el objetivo principal de esta tesis fue analizar la eficiencia energética de otras tecnologías para la manufactura, uso y disposición final de bolsas individuales para transportar mercancías, diferentes a las que se manufacturan con los polietilenos de baja y alta densidad, así como el uso de recursos naturales no-renovables, la contaminación que genera la operación de todas las tecnologías y su valor económico, se considera que la metodología presentada fue la adecuada, puesto que a través de ésta se analizaron diferentes criterios próximos al objetivo general y los objetivos específicos y que se refieren al uso sostenible de los materiales que se producen a través de la operación de las otras tecnologías que se proponen.

En esta tesis se presentaron algunos criterios importantes para abordar el problema de la sustitución de las bolsas desechables fabricadas de polietileno. Estos criterios, que están relacionados con el consumo de materiales y de energía, la emisión de contaminantes a la atmósfera y un criterio de valorización económica, fueron calculados para así evaluar cada una de las opciones con el objetivo de encontrar aquellos materiales que, desde el punto de vista del uso eficiente de la energía y de los recursos, demostraran ser más aptos para la aplicación en particular de bolsas para el transporte de mercancías.

Lo anterior se logró al utilizar modelos para la ayuda de la toma de decisiones con criterios múltiples. Esto hizo posible evaluar los materiales, jerarquizarlos y ordenarlos de acuerdo con su desempeño durante su ciclo de vida.

A lo largo del desarrollo de esta investigación se verificaron las hipótesis planteadas al inicio encontrando opciones tecnológicas que presentan un mejor desempeño considerando el conjunto de criterios propuestos.

Lo anterior se logró gracias a la cuantificación, para cada material, de cada uno de los parámetros evaluados.

Los diferentes materiales fueron comparados bajo ciertos criterios, todos ellos derivados de los objetivos planteados considerando como centro de la preocupación, la sostenibilidad. Estos fueron:

- la utilización real de la energía en toda la cadena de producción,

- las pérdidas en la calidad de la energía (exergía), que pueden ser utilizadas para cuantificar la sostenibilidad de un proceso, cadena de producción o producto,
- el consumo de materias primas provenientes de recursos no renovables,
- las emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente y,
- el valor monetario de los productos.

En efecto, estos criterios miden, a través del ciclo de vida, diferentes características del aprovechamiento o desperdicio, según sea el caso, que se puede presentar en cada uno de los materiales evaluados. El balance de materia en el ciclo de vida, medido en barriles de petróleo crudo equivalentes, indica la medida de la conservación de un importante recurso natural no renovable. El segundo criterio, es decir, la energía real consumida calculada a través de la primera ley de la termodinámica, también mide de forma indirecta el posible agotamiento de los recursos no renovables, ya que generalmente ésta proviene de fuentes fósiles y, en su producción, se generan también emisiones contaminantes que son descargadas a la atmósfera. El tercer criterio, que corresponde a la irreversibilidad, es el resultado del balance de exergía y mide la eficiencia energética de los procesos y de los productos. Las emisiones de CO₂ se consideraron por ser el gas más representativo de los gases de efecto invernadero (GEI). Por último, una medida de la importancia económica de los productos queda representada por el valor del producto, conformado por la ganancia (en términos del retorno de la inversión) y el costo total de producción.

Cabe mencionar que el polietileno no es el único plástico que se produce a gran escala y tiene aplicaciones con tiempos de uso final muy cortos. Ejemplos de lo anterior pueden ser también las botellas de poli-tereftalato de etileno (PET), o los vasos desechables de poliestireno, por mencionar dos de ellos.

En estos y muchos otros casos, el problema al que se enfrenta la sociedad usuaria no es el producto polimérico en sí mismo, sino el uso que se le da y el carácter de desechable que se le otorga al producto manufacturado al término de su vida útil al nivel de su consumo final. Al desecharlos prontamente, se está desperdiciando el contenido energético de los plásticos principalmente, considerando su alto poder calorífico o, alternativamente, su reciclamiento físico y/o químico.

Como muestra representativa de aquellos materiales de origen natural aptos para manufacturar bolsas, se analizaron el algodón y el papel tipo Kraft. Para el caso de materiales provenientes de recursos fósiles se analizaron el polietileno de alta y de baja densidad por ser los materiales actualmente destinados a este fin (en este caso el estudio partió tanto de petróleo crudo como de gas natural húmedo como los recursos iniciales con los que se fabrica el polímero correspondiente) y el polipropileno, ya que la fibra de este material se puede utilizar para la fabricación de bolsas con carácter “reusable”.

Adicionalmente, se puede considerar la mezcla de los polietilenos con compuestos que inducen la degradación, para de esta manera acortar el tiempo de vida de las bolsas desechables y el tiempo que permanecen en los sitios de disposición de la basura (residuos sólidos).

Otra de las conclusiones útiles de esta investigación se refiere a leyes decretadas con carácter de sostenibilidad como la que la Asamblea Legislativa del Distrito Federal (ALDF) aprobó el 18 de agosto del año 2009. En esa ley se emitió un decreto que modifica la Ley de Residuos Sólidos de esta entidad. A través de este decreto, los establecimientos comerciales no pueden otorgar a título gratuito bolsas para el transporte de las mercancías que no posean la característica de ser “degradables”.

Sin embargo, se considera y fue probado con los resultados de esta tesis, que la mencionada ley no fue formulada con fundamentos científicos y técnicos más allá de la simple consideración de que se está haciendo un bien al ambiente, sin contar con las bases necesarias para probar la eficacia de esa ley. Por ello, se considera que este estudio puede ayudar a la toma de decisiones de esta problemática en particular.

Esto debería ser el ejemplo de los sólidos vínculos que deben desarrollarse e incrementarse entre las instituciones de investigación y el gobierno.

Se considera entonces que la metodología desarrollada en esta tesis comprobó ser de ayuda para las comparaciones entre diversos materiales y que puede ser aplicada para cualquier proceso, producto o servicio o cadena de producción donde se requiera evaluar el desempeño ambiental, económico y de uso eficiente de energía.

Se consideran en estas conclusiones algunos de los aspectos que son sobresalientes:

- El empleo del análisis de exergía como herramienta para evaluar el uso de la energía lleva a medir la cantidad de energía que realmente es aprovechada. Es por ello que los análisis de exergía son extremadamente útiles para lograr el desarrollo sostenible. En este sentido, el análisis de exergía es una herramienta que puede ser utilizada con éxito en la evaluación del desempeño de diversos materiales, especialmente aquellos de desecho rápido, ya que al presentar un ciclo de vida muy corto, su consumo y consecuente producción se retroalimentan de manera dinámica, con peligro de no aprovechar eficazmente los recursos que los generan.
- Por otra parte, el desarrollo de la presente tesis, especialmente al considerar el análisis integral de ciclo de vida propuesto, genera conocimiento sobre la utilidad del análisis de exergía considerando el concepto de ciclo de vida. Este conocimiento es útil no sólo para apreciar la eficiencia energética y/o las oportunidades de aprovechamiento de energía sino también para diseñar estrategias de gestión de los recursos.
- Siendo el desarrollo sostenible un concepto que se está utilizando en los grandes acuerdos mundiales sobre contaminación y medio ambiente, éste se aborda en esta tesis como un concepto fundamental para las actividades humanas, resaltando la importancia de la conservación de los recursos naturales y el aprovechamiento de la energía.
- La sostenibilidad y la exergía son conceptos que simultáneamente se retroalimentan, como se representó en la Figura 2.4, ya que como bien se observa en ese esquema, a mayor trabajo útil aprovechado (eficiencia exergética), mayor sostenibilidad. Esta afirmación puede extenderse a todo el ciclo de vida de productos y procesos como quedó exitosamente demostrado en la presente tesis al evaluar cadenas de producción de diferentes materiales para, posteriormente, compararlos entre sí.
- La integración del concepto del análisis de ciclo de vida con el análisis de exergía da como resultado una herramienta de gestión ambiental que considera la calidad de los recursos energéticos utilizados para el ciclo de vida de un producto o servicio: el análisis de ciclo de vida exergético.
- La exergía también está relacionada de manera indirecta con los costos, ya que mientras más pérdidas de exergía existan, se incurre en un mayor consumo de energía y, por lo tanto, en mayores costos.

- El análisis de diferentes opciones de materiales para la fabricación de bolsas para transportar bienes, muestra la reducción de exergía que presentan los procesos de producción seleccionados y, por consiguiente, su contribución al agotamiento de los recursos.
- Es importante señalar que el cálculo de exergía correspondió a la exergía química estándar, debido a que ésta representa la mayor aportación de exergía de una corriente. Sin embargo, los resultados pudieran presentar ciertas limitaciones en su significado en relación con el análisis de exergía total (exergía física más exergía química) de la cadena de producción, que podría ser una siguiente etapa de esta investigación.

Esta contribución al campo del conocimiento se alcanzó aplicando las conceptualizaciones ya citadas, examinando cadenas o procesos completos de producción. En efecto, los análisis exergéticos, como el realizado en la presente tesis, no son muy comunes en México, éstos siendo mayormente aplicados en Europa. En la literatura especializada existen publicaciones que utilizan el concepto de exergía sobre todo aplicándolo a la transformación de la energía. Es necesario reconocer que existen trabajos con un enfoque similar al aquí presentado; sin embargo, estos estudios solamente evalúan la exergía del ciclo de vida, dejando de lado otros parámetros que simultáneamente se consideraron en esta tesis, como los correspondientes a los balances de materia y energía, los de tipo económico y los que se refieren a la contaminación atmosférica.

Por otro lado, en el caso de comparaciones entre productos que cumplan la misma función, fue necesario y extremadamente útil definir la unidad funcional para cada uno, asegurando así la equivalencia entre los distintos materiales. En estas comparaciones es importante identificar aquella opción que resulte con un mejor desempeño a lo largo del ciclo de vida en relación con los criterios requeridos y para que cada material cubra la necesidad deseada.

Al obtener la jerarquización y ordenamiento de las diferentes opciones en evaluación con métodos para la ayuda a la toma de decisiones, especialmente, PROMÉTHÉE-GAIA, mediante el software Decisión Lab, se observa un ordenamiento de mejor a peor desempeño de los materiales de acuerdo con los criterios propuestos y con los “pesos” designados para cada uno de los criterios en el modelo.

Pudo verse que de las once opciones propuestas para el estudio de caso desarrollado, que las que presentan mejor rendimiento son aquellas que en vez de tener un ciclo de uso final corto y después ser desechados sin aprovechamiento alguno, son usadas repetidas veces. En efecto, al ser bolsas “reusables”, se aprovechan mejor los recursos invertidos en su fabricación. Estas bolsas corresponden a las manufacturadas con algodón y polipropileno.

Como una conclusión no esperada, es importante hacer notar que la obtención de etileno a partir del gas natural húmedo, representa un mayor consumo de recursos, así como de energéticos, presentando por consecuencia un mayor número de emisiones que al fabricar el etileno a partir de petróleo crudo.

Se quiere dejar constancia de que, si bien es cierto que se seleccionaron únicamente los materiales mencionados en párrafos anteriores, se podrían también haber comparado el yute y el henequén, como materiales que se utilizaron en México años atrás, antes de que el polietileno se utilizara a gran escala para la manufactura de bolsas desechables. Queda abierta la posibilidad de realizar un estudio más profundo con estos y otros materiales como los mencionados.

Se partió del consumo anual de polietileno en el año 2009, para ser usado como bolsa, que fue de 567,680 toneladas para este uso en especial, es decir, 101,371 millones de bolsas. Suponiendo una sustitución del 30% de las bolsas de polietileno que se consumen en un año, por bolsas “reusables” de polipropileno, se dejaría de incurrir en la fabricación de 30,411 millones de bolsas desechables de polietileno, de acuerdo con la unidad funcional propuesta. Dichas bolsas se sustituirían con la fabricación de 33 millones de bolsas “reusables” de polipropileno.

Con esto, la cantidad en cada uno de los criterios que se deja de utilizar (se ahorra), se muestra en la siguiente información:

Barriles de petróleo	Energía (barriles de petróleo crudo equivalente)	Irreversibilidad (barriles de petróleo crudo equivalente)
11,659,539	1,704,308	1,774,609

considerando los recursos y energía utilizados en la manufactura de las bolsas de polipropileno que se tendrían para sustituir a las de polietileno de alta densidad y teniendo como materia prima del etileno al petróleo crudo (que se eligió por presentar el mejor desempeño entre los polietilenos).

En cuanto a las emisiones, se dejarían de emitir 911,021 toneladas de CO₂. Por otro lado, el valor del producto presenta una disminución de 457 millones de dólares; sin embargo, éste se compensa con el valor de los barriles de petróleo que se dejaron de consumir, el cual tan solo para el caso del balance de materia corresponde a 757 millones de dólares, considerando un precio de 65 US\$/barril.

El cálculo de las pérdidas de exergía totales, proporciona no sólo una medida de la disponibilidad de energía o del agotamiento de los recursos, sino que también es el criterio más adecuado para mejorar la eficiencia tecnológica del sistema de producción industrial. De esta manera, el análisis de exergía, asociado a los balances de materia y energía de un proceso, representa un avance importante para la evaluación multicriterio de los productos.

Sin duda alguna, se puede afirmar que la sustitución de bolsas de uso personal para transportar mercancías con materiales diferentes a los polietilenos, que ahorren energía y recursos naturales no renovables y con un menor número de emisiones GEI a la atmósfera en su ciclo de vida completo, representa una oportunidad para México y para otros países al utilizar mejor los recursos naturales.

APÉNDICE I

PROCESOS DE PRODUCCIÓN

Este apéndice describe de manera breve las principales características de los materiales estudiados, así como los procesos para producirlos que sirvieron como referencia en esta tesis.

En este apéndice se exponen las principales características, aplicaciones y el proceso de producción utilizado para cada una de las opciones. En el caso de los polímeros, el proceso de producción se eligió de acuerdo con los resultados presentados por García-Aranda (2008), donde muestra las rutas óptimas para la cadena completa de producción de derivados petroquímicos.

POLIETILENO

El polietileno ha sido producido comercialmente por más de 60 años y es uno de los polímeros de mayor consumo en el mundo. Tan sólo en 2009 su consumo a nivel mundial se estimó en aproximadamente 64 millones de toneladas métricas (Anónimo, 2010b).

Antiguamente llamado “polimetileno”, el polietileno pertenece al grupo de los polímeros de las poliolefinas. El polietileno es químicamente el polímero más simple, su unidad repetitiva es:

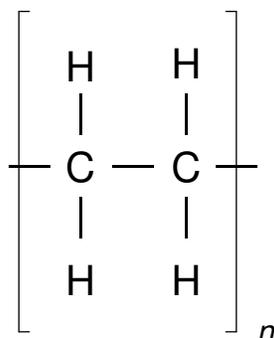


Figura A1.1. Unidad repetitiva del polietileno

Los polietilenos son resinas termoplásticas producidas por procesos de alta o bien de baja presión; esto da como resultado una familia de polietilenos, que es clasificada con base principalmente en su densidad, de acuerdo con la ASTM (American Society for Testing Materials) como: polietileno de alta densidad (PEAD, HDPE por sus siglas en inglés), polietileno de baja densidad (PEBD o LDPE), polietileno lineal de baja densidad (PELBD o LLDPE), polietileno de alta densidad y alta masa molecular (PEAMM, HMM-HDPE en inglés) y polietileno de ultra alta masa molecular (PEUAMM o UHMMPE), que poseen distintas características de funcionalidad.

Breve historia del polietileno (*Wells, 1991*)

El polietileno fue sintetizado por primera vez por el químico alemán Hans von Pechmann quien por accidente lo preparó en 1898 cuando calentaba diazometano.

En 1933 fue sintetizado por Reginald Gibson y Eric Fawcett en Inglaterra, quienes trabajaban para los laboratorios de la empresa Imperial Chemical Inc. (ICI). Esto fue logrado aplicando una presión de aproximadamente 1400 bar y una temperatura de 170°C, sobre un recipiente que contenía etileno y benzaldehído. Sin embargo, la reacción había sido desencadenada por rastros de oxígeno contenidos en el recipiente y no fue posible replicarla con éxito hasta 1935, cuando otro químico de la compañía ICI, Michael Perrin, desarrolló una síntesis industrial reproducible para la síntesis de polietileno de baja densidad.

La primera tonelada de material demostró cualidades de aislamiento eléctrico inigualables y, en 1938, ICI comenzó la producción industrial, que fue íntegramente absorbida por las necesidades bélicas. Terminada la guerra, el polietileno corría el riesgo de desaparecer de la cartera de productos ICI, pero los resultados de las investigaciones sobre posibles nuevas aplicaciones demostraron que era un material versátil.

Posteriormente, se desarrollaron catalizadores para estos procesos. El primer catalizador tuvo como base el bióxido de cromo y fue descubierto en 1951 por Robert Banks y John Hogan en Phillips Petroleum.

La presión requerida para lograr la polimerización del etileno era alta, el científico alemán Karl Ziegler y el italiano Giulio Natta, originaron con su investigación, los catalizadores Ziegler-Natta, que son catalizadores metálicos de transición, con lo cual, obtuvieron el reconocimiento del premio Nobel en 1963 por su aporte científico a la química. Con estos catalizadores se logra la polimerización a una presión más baja que la que se venía manejando.

Un tercer sistema catalítico, basado en metalocenos, fue descubierto en Alemania en 1976 por Walter Kaminsky y Hansjörg Sinn. La catálisis de metalocenos y la catálisis Ziegler demostraron una excelente flexibilidad en la síntesis de mezclas de eteno y α -olefinas, sentando las bases de la amplia gama de polietilenos existentes (*Wells, 1991*).

POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD) (*Wells, 1991*)

El descubrimiento hecho por Ziegler y Natta en los años 50 del siglo XX, de catalizadores capaces de polimerizar etileno a presiones y temperaturas menores a las que se estaban empleando revolucionó la producción de poliolefinas. Estos catalizadores consisten en derivados de los metales de transición: titanio, vanadio o zirconio con compuestos organometálicos de aluminio. El polímero resultante de este nuevo proceso tuvo una estructura más cristalina, así como una mayor densidad. Para diferenciarlo del polietileno producido normalmente, con una menor densidad, se le llamó polietileno de alta densidad. Casi al mismo tiempo, investigadores en los Estados Unidos descubrieron que catalizadores basados en cromo, óxidos de molibdeno sobre sílice o sílice-alúmina, eran capaces también de polimerizar etileno a temperaturas y presiones menores.

Estos métodos basados en catalizadores además de mejorar la eficiencia del proceso controlan la masa molecular del polímero formado. El hidrógeno se emplea comúnmente como un regulador de la masa molecular.

La polimerización en suspensión, en solución o en fase gaseosa se pueden utilizar para la fabricación de PEAD. La polimerización en suspensión fue la tecnología utilizada originalmente debido a su flexibilidad. Los procesos en solución son utilizados cuando se requiere producir polímeros de baja masa molecular. La tecnología introducida por Union Carbide y más tarde por otras compañías fue la polimerización en fase gaseosa. En este proceso se emplea un catalizador en estado sólido.

Proceso de producción (*PEP, 1998; Ullmann, 1989*)

En esta tesis, los cálculos son hechos con base en el proceso de polimerización de etileno en suspensión en fase líquida o Tecnología Phillips (*PEP, 1998*).

En este proceso, el etileno grado polímero, un diluyente y un catalizador son alimentados de manera continua en un reactor a una presión de 3-4 MPa. La polimerización se lleva a cabo a una temperatura de 85 a 100°C.

Este proceso se conoce frecuentemente como el proceso de forma de partícula, debido a que las partículas del catalizador mejorado de cromo y silicio son suficientemente activas a temperaturas bajas, como para que el polímero precipite, dejando cantidades relativamente pequeñas de polímero disuelto en el diluyente, la viscosidad del diluyente es baja y se mantienen altas concentraciones del polímero en el reactor.

En la Figura A1.2 se presenta un diagrama simplificado para este proceso. El reactor tubular de doble lazo está construido con tubos enchaquetados de grueso calibre y fue diseñado por los ingenieros de Phillips para evitar la deposición de partículas. Este reactor también tiene una elevada relación superficie-volumen, lo que facilita la remoción del calor de reacción y permite tiempos de residencia cortos. El impulsor hace que la mezcla de reacción fluya a través de la tubería en un régimen turbulento con una velocidad de 5-10 m/s.

Se utiliza isobutano como diluyente, ya que facilita su separación subsecuente y permite trabajar a temperaturas de operación mayores a las que se tendrían si se utiliza otro alcano de mayor masa molecular.

El catalizador es vertido dentro del reactor junto con el diluyente desde el dispositivo de control ubicado en la base del tanque para la mezcla de catalizador. El polímero resultante se extrae de la sección de sedimentación ubicada en la parte inferior del reactor. Esto permite que la suspensión entre al tanque “flash” (de vaporización instantánea) a una concentración de 55-65%, en vez de la que circula en el reactor (30-35%).

El diluyente del efluente del reactor se vaporiza disminuyendo así la presión. El polímero recuperado se “peletiza” directamente sin remover el catalizador.

En la Tabla A1.1 se presentan las principales propiedades del polietileno de alta densidad.

Tabla A1.1. Propiedades del polietileno de alta densidad. *Fuente: James, 1999*

Masa molecular, g/mol	$1 \times 10^3 - 8 \times 10^6$
Masa molecular de la unidad repetitiva, g/mol	28
Densidad @20°C, g/cm ³	0.94-0.97
Temperatura de fusión, K	418
Elongación, %	15-100

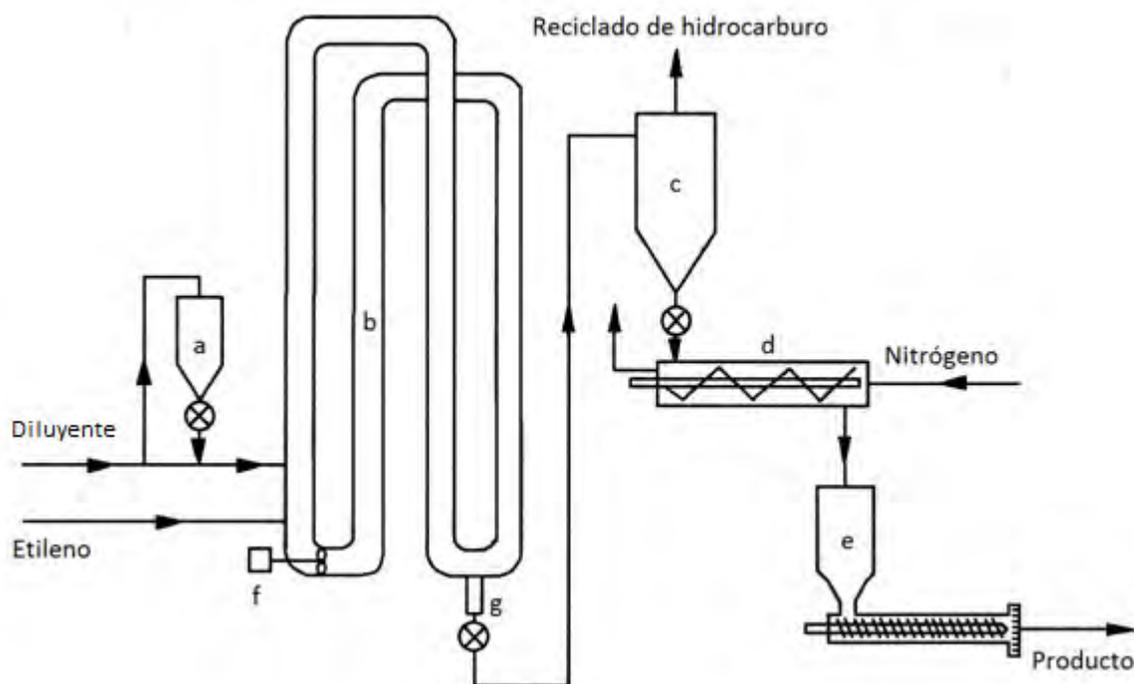


Figura A1.2. Proceso de partícula de Phillips. a) Tolva de catalizador y válvula de alimentación; b) reactor de doble lazo; c) tanque “flash”; d) secador de purga; e) extrusor; f) impulsor; g) sedimentador. Fuente: Ullmann, 1989

Aplicaciones del PEAD (Wells, 1991)

El PEAD tiene su principal aplicación en el moldeo por soplado, con una participación de más del 40% de la demanda mundial de este polímero. Con esta técnica se fabrican botellas para leche, contenedores para envasado, tambores, tanques de gasolina para automóviles, juguetes y artículos para el hogar.

La película de PEAD, que utiliza un 14% de la demanda de este material, se utiliza para un gran rango de aplicaciones entre las que se incluyen envolturas, bolsas para basura, bolsas para el transporte de mercancías y revestimientos industriales.

Las tuberías obtenidas por extrusión para agua potable y residual, para gas y para irrigación, para conductos, para recubrimiento de alambres y para aislamiento de cables, requieren de alrededor del 14% del PEAD producido. La variedad de artículos fabricados con PEAD por moldeo o por

inyección incluye cajas, contenedores para empaque, tapas, botes de pintura, artículos para el hogar y juguetes que, en conjunto, consumen otro 14% de la demanda total.

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PEBD) (*Ullmann, 1989*)

La producción de PEBD a gran escala, que comenzó en los años de 1950, se lleva a cabo en un reactor tipo autoclave o tubular, utilizando un iniciador de radicales libres. Se puede usar un amplio rango de iniciadores que consisten principalmente en uno o dos peróxidos, que operan ya sea a altas o bajas temperaturas.

La gran cantidad de calor generada durante la reacción es removida por medio de chaquetas de enfriamiento o por medio de una alimentación de etileno frío. El calor generado se utiliza para generar vapor de baja presión.

Recientemente se ha hecho énfasis en procesos que ahorren energía y materia prima, llevando a cambiar de PEBD a polietileno lineal de baja densidad, PELBD que ofrece una ventaja en cuanto a rendimiento y costo, sobre el PEBD. Por otro lado, se está incrementando la fabricación de grados de PEBD que contienen ya sea, comonomeros olefínicos como hexeno y octeno o comonomeros polares, ya que ambos extienden el rango de propiedades del polímero. Algunos ejemplos de estos comonomeros son el acetato de vinilo, el acetato de butilo y el ácido acrílico.

Proceso de producción (*Wells, 1991*)

El polietileno de baja densidad (PEBD o LDPE por su nombre en inglés) se obtiene a través de la polimerización del etileno a altas presiones. Existen dos procesos para la producción de PEBD, como ya se dijo, ambos son similares. La diferencia entre ellos es básicamente el tipo de reactor utilizado: un reactor tipo autoclave o bien un reactor tubular.

La presión de reacción se encuentra típicamente en el rango de 150-200 MPa para el proceso con reactor autoclave y 200-350 MPa para el reactor tubular. En la presente tesis, el proceso de referencia fue la polimerización en un reactor tubular.

El etileno virgen a 5 MPa entra en contacto con el etileno reciclado que posee una baja presión y es comprimido a 25 MPa. Después se mezcla con etileno reciclado que se encuentra a presión intermedia, se le aumenta la presión a la corriente hasta la presión de reacción (150-300 MPa) y se alimenta al reactor. La presión en el reactor es controlada de manera automática por una válvula de control de flujo en la salida del reactor.

Los iniciadores son inyectados en la alimentación antes de entrar al reactor. El sistema de iniciación más utilizado consiste en una mezcla de peróxidos de baja temperatura, como el butilo terciario o bien amil-peroxipivalato, con un peróxido de alta temperatura como el hidroperóxido butilo terciario.

La polimerización se inicia a una temperatura de 140-180°C y ésta incrementa rápidamente a 300°C a medida que la reacción se lleva a cabo. Para alcanzar la alta velocidad requerida para una efectiva transferencia del calor de reacción hacia la chaqueta de enfriamiento, la presión de salida es reducida de manera intermitente. Esta acción también ayuda a controlar la reacción y a mejorar las propiedades del polímero.

La mezcla proveniente del reactor es llevada a un enfriador para reducir la temperatura del polímero a un valor adecuado para alimentar la máquina extrusora para su “peletización”. El polietileno es entonces separado de la mayor parte del monómero sin reaccionar en un separador a 27 MPa. Este valor de presión se elige para lograr un equilibrio entre la eficiencia de la separación y el ahorro de energía respecto a la compresión.

El monómero restante es retirado en un separador que opera a baja presión y que alimenta la máquina extrusora para fabricar los gránulos o “pellets”. El “peletizado” se lleva a cabo bajo el agua por un troquel de corte. Posteriormente, los “pelets” son secados y almacenados en silos hasta que son cargados en cajas o bolsas para su transporte y/o almacén.

La inyección del iniciador en diferentes posiciones a lo largo del tubo produce pequeños cambios en la temperatura, aumentando la conversión del proceso. Haciendo esto se pueden alcanzar conversiones mayores que las obtenidas en la polimerización en un reactor autoclave, pero a expensas de un alto costo debido a la energía para compresión.

Aunque se han alcanzado conversiones de hasta 35% (comparados con 20% para el proceso en reactor tipo autoclave), la conversión máxima que se puede obtener depende de la calidad requerida del producto, ya que la calidad de éste se va deteriorando a medida que se incrementa la conversión. Este proceso se observa en la Figura A1.3 (Wells, 1991).

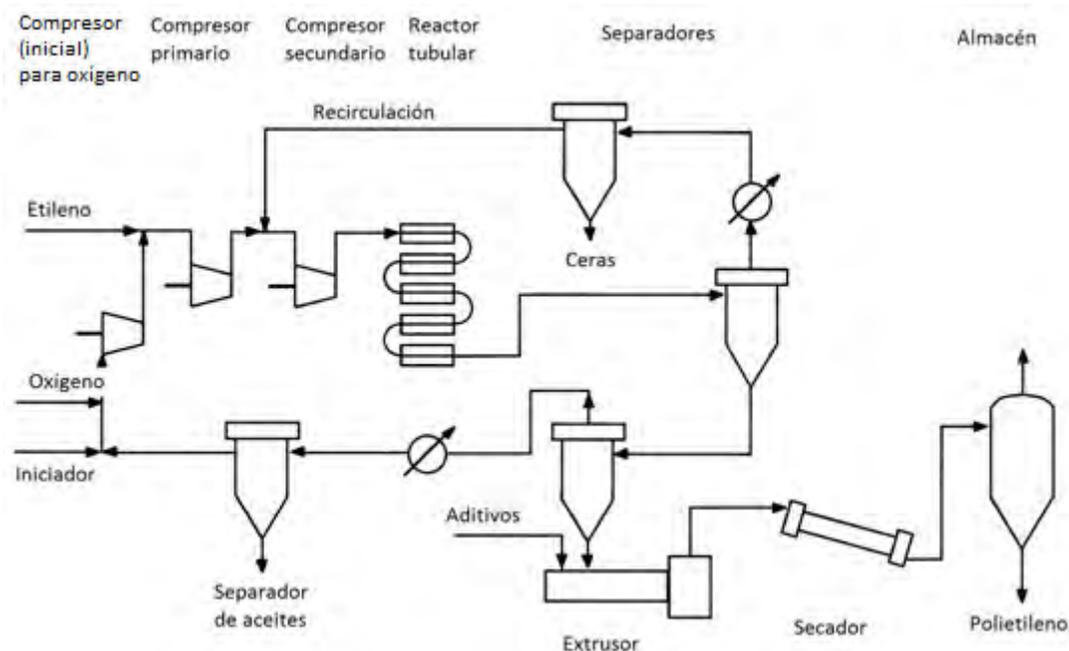


Figura A1.3. Obtención de polietileno de baja densidad por medio de la polimerización de etileno en un reactor tubular. Fuente: Wells, 1991

Las propiedades elementales del polietileno de baja densidad, se pueden observar en la Tabla A1.2.

Tabla A1.2. Propiedades del polietileno de baja densidad. Fuente: James, 1999

Masa molecular, g/mol	3-40x10 ⁴
Densidad @20°C, g/cm ³	0.910-0.935
Temperatura de fusión, K	378-388
Elongación, %	550-600

Aplicaciones del PEBD (Ullmann, 1989; Wells, 1991)

El PEBD se utiliza en aplicaciones donde se requiere transparencia y flexibilidad, ya que es de fácil procesamiento y presenta barrera a la humedad. Su mayor aplicación es como película para bolsas de diversa índole, por ejemplo, para transporte de productos del supermercado, bolsas para basura, bolsas para pan. Esta aplicación representa un 60-70% del consumo de PEBD.

Como ya se mencionó, este material es también muy utilizado en el sector de envase y embalaje, destacando su utilización en botellas, envases industriales, laminaciones, película para forro, película encogible, recubrimientos, sacos y costales, tapas para botellas y otros. En la construcción, se puede encontrar en tuberías (conduit) y en la agricultura tecnificada como película para invernaderos.

En la industria eléctrico-electrónica se utiliza como aislante para cables y conductores, cable de alta frecuencia y material dieléctrico. También se fabrican con él juguetes pequeños, entre otros productos.

Como para esta tesis la fabricación de la película de polietileno es la aplicación de interés, a continuación se mencionan los principales métodos para fabricarlas.

Películas:

Para producir películas se utilizan diferentes procesos que dependen del tipo de plástico y de las propiedades deseadas. La resistencia y otras propiedades de la película son afectadas por el proceso empleado.

“Calandreo”: En la jerga industrial, el *“calandreo”* es un proceso empleado para fabricar películas, láminas y telas recubiertas. Su aplicación más común es utilizando el policloruro de vinilo (PVC) plastificado para cubreasientos. Varios otros plásticos se procesan también por *“calandreo”*, incluyendo el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), polietileno de alta densidad, polipropileno y poliestireno. Las formulaciones de las resinas deben adaptarse específicamente para el proceso de *“calandreo”*.

Un proceso típico se inicia mezclando resina del polímero en polvo con plastificantes líquidos y aditivos. La masa pastosa se alimenta a una serie de rodillos de amasado del proceso de “calandreo”. Ver la Figura A1.4 (*Driver, 1991*).

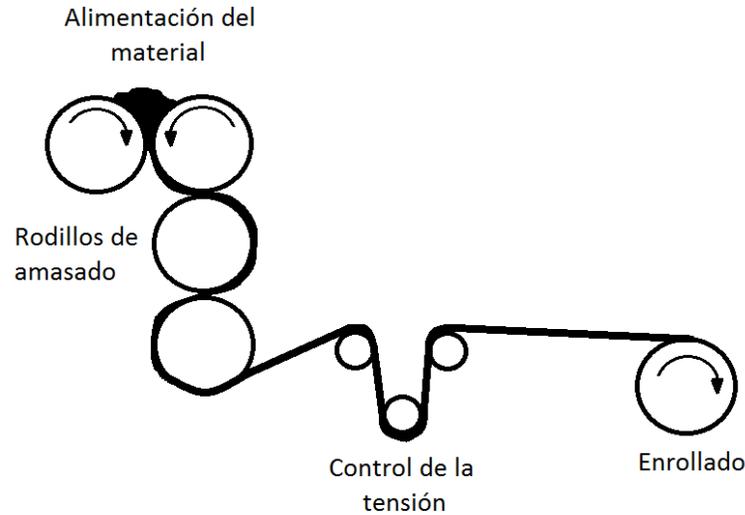


Figura A1.4. Proceso de “calandreo”. Fuente: *Driver, 1991*

Estos rodillos generan calor y fuerzas cortantes y la mezcla de resina y plastificante se funde produciendo una masa homogénea. Otra serie de rodillos forma la película, la estira, la grava y la lamina con las telas cuando así se requiere.

Películas extrudidas: la extrusión es el método más adecuado para producir película con la mayor parte de los plásticos fundibles. El proceso consiste en un cabezal de extrusión con una boquilla o “dado de ranura” por donde se fuerza el paso del material para producir la película. La película extrudida puede fabricarse con o sin estirado.

Aditivos para inducir la degradación (polímeros oxo-biodegradables) (*Ojeda et al., 2009*)

Debido a que otros de los materiales que han sido puestos en competencia en la comparación que se realizó en esta tesis fueron los polietilenos oxodegradables, a continuación se proporciona una breve explicación sobre sus principales características.

Los polímeros sintéticos se acumulan en el ambiente a una razón de 25 millones de toneladas métricas al año. Los polietilenos representan el 64% del material plástico que se produce como empaque y botellas, que son usualmente desechados después de un uso corto (Sudhakar et al., 2008).

Entre los materiales para empaque, las bolsas de plástico se acumulan en el ambiente debido a su baja capacidad de degradarse, pues la duración de su degradación puede llevarse alrededor de 150 años (SEMARNAT, 2010), dependiendo de las condiciones del medio ambiente en tiraderos a cielo abierto, así como de las propiedades del polímero en sí. Por ello, tales materiales generan contaminación y ocupan un volumen importante en los tiraderos y rellenos sanitarios. Una escala relativa de la degradación de un polímero se muestra en la Figura A1.5 (Scott, 2000). Asimismo, al tener una baja densidad y ser desechadas usualmente contaminadas por residuos principalmente orgánicos, el reciclado es, muchas veces, económicamente inviable (Scott, 2000). Además, si estos polímeros se llevaran a una planta de compostaje, éstos no se eliminan totalmente y, por ello, siguen contaminando.

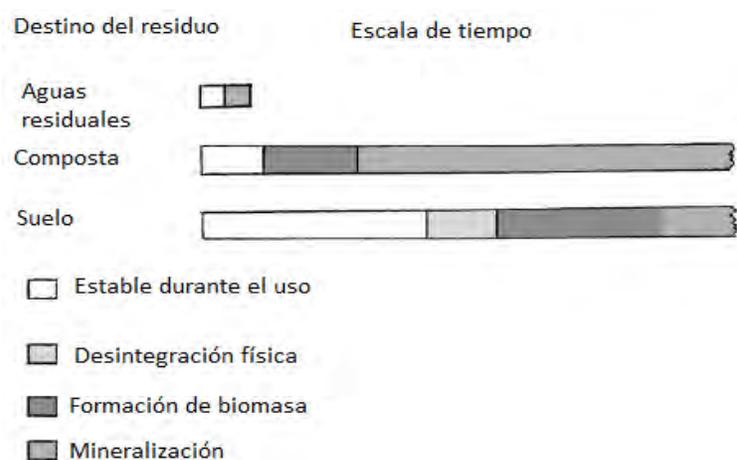


Figura A1.5. Escala de tiempo relativa para la degradación de polímeros en diferentes ambientes.

Fuente: Scott, 2000

El uso de materiales biodegradables podría ser una solución para reducir la acumulación en el ambiente y la contaminación visual. Estos materiales se dividen en dos tipos: aquellos que son intrínsecamente biodegradables, cuya estructura química permite la acción directa de las enzimas

(como amilasas y celulasas) y aquellos que se convierten en biodegradables después de uno o más procesos físicos y/o químicos, como la hidrólisis, fotólisis o la pirólisis.

En el segundo grupo se encuentran los materiales poliméricos que contienen un pro-oxidante y son conocidos como polímeros oxo-biodegradables. Estos materiales requieren degradación oxidativa (normalmente por la acción de la radiación ultravioleta o el calor), para así reducir la masa molar y formar grupos oxigenados, los cuales son metabolizados más fácilmente por microorganismos.

Los aditivos pro-oxidación son adicionados a bajas concentraciones (típicamente 1-5% masa) en la formulación de las resinas convencionales de polímero, casi sin cambiar las propiedades mecánicas y ópticas. Estos materiales con aditivos pro-oxidación han sido utilizados como película, en la industria agrícola y en bolsas de supermercados y de basura, entre otras aplicaciones (*Ojeda et al., 2009*).

Después de muchos años de investigación, se ha establecido que el mecanismo de oxo biodegradación del polietileno, consta de dos etapas: (1) la oxidación abiótica (foto o termo-oxidación) y (2) la biodegradación microbiana. La oxidación abiótica inicial es una etapa importante, ya que determina la tasa de biodegradación de todo el proceso. En esta etapa, el polietileno es oxidado, reduciendo así su masa molecular de manera significativa. Por otra parte, grupos hidroxilo (OH), carbonilo (C = O) y carboxilo (COOH) se introducen en la cadena de polietileno, lo que lleva a su posterior oxidación. Los principales factores que influyen en la oxidación abiótica son el calor y la luz del Sol. Estos factores son cruciales tanto para la reducción de la masa molecular como para la producción de compuestos de baja masa molecular que pueden ser asimilados más fácilmente por los microorganismos.

La división de la cadena y el aumento en la hidrofilia observado durante la oxidación del polietileno, generan una pérdida de propiedades mecánicas, así como la fragmentación de la película a nivel macroscópico.

Como se mencionó en el capítulo donde se expone el estudio de caso y los materiales estudiados, el polietileno no es biodegradable, principalmente porque tiene una elevada masa molecular. Los aditivos pro-oxidantes (prodegradantes) son complejos de iones metálicos de transición y se adicionan al polietileno en la forma de estearato o de otro tipo orgánico de complejos ligandos.

Como ya se mencionó, entre las sustancias que componen los aditivos pro-oxidantes se encuentran los compuestos del cobalto, el manganeso y el hierro, así como sustancias formadas por moléculas poliinsaturadas. El compost resultante de polímeros con estos aditivos oxo-biodegradables no mostró ecotoxicidad en pruebas con organismos, según estudios reportados en la bibliografía.

POLIPROPILENO (*Boustead, 2005; Garbulinski et al., 2006*)

El polipropileno o poli(1-metiletileno) es el polímero obtenido a partir de las olefinas, particularmente del propileno que es un gas incoloro en condiciones normales de temperatura y presión, que se licúa a una temperatura de -48°C . El polipropileno es un termoplástico semicristalino, y comparado con el polietileno presenta un mayor punto de fusión y menor densidad. Así mismo, presenta una buena combinación entre sus propiedades mecánicas y térmicas, lo que le permite ser utilizado tanto en el moldeo por inyección como en la fabricación de películas y fibras.

El polipropileno es uno de los plásticos con mayor consumo a nivel mundial, como podrá observarse en el apartado dedicado brevemente a mostrar esta información comparándolo con otros polímeros.

El polipropileno tiene múltiples aplicaciones, por lo que es considerado como uno de los productos termoplásticos con mayor desarrollo. Es un producto inerte, reciclable, su incineración no tiene fuertes efectos contaminantes y su tecnología de producción tiene un bajo impacto ambiental (*Boustead, 2005*). Ésta es una característica atractiva frente a materiales alternativos.

Su estructura química se representa en la Figura A1.6.

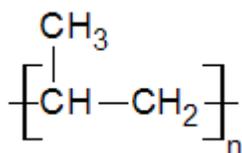


Figura A1.6. Estructura repetitiva del polipropileno

La polimerización catalítica del propileno fue descubierta por el italiano Giulio Natta en 1954 y marcó un notable hito, tanto por su interés científico, como por sus importantes aplicaciones en el ámbito industrial. Los altos rendimientos de reacción permitieron su rápida explotación comercial. Aunque el polipropileno fue dado a conocer a través de patentes y publicaciones en 1954, su desarrollo comercial comenzó en 1957 (*Driver, 1991*) y fue debido a la empresa italiana Montecatini. Pocos años más tarde, otras empresas, entre ellas ICI y Shell fabricaban también dicha poliolefina.

Hoy en día el polipropileno es uno de los termoplásticos más vendidos en el mundo, con una demanda anual estimada de 40 millones de toneladas en el 2006. Sus incrementos anuales de consumo han sido próximos al 10% durante las últimas décadas, confirmando su grado de aceptación en los mercados (*Garbulinski et al., 2006*).

Debido a sus propiedades, así como a su versatilidad en precio, el polipropileno ha sustituido gradualmente a materiales como el vidrio, los metales o la madera, así como a polímeros de amplio uso general como el ABS y el PVC.

Estructura del polipropileno (*Garbulinski et al., 2006*)

Estructuralmente es un polímero vinílico, similar al polietileno, pero en este caso, uno de los carbonos de la unidad monomérica tiene unido un grupo metilo.

El polipropileno es un polímero lineal, cuya espina dorsal es una cadena de hidrocarburos saturados. Cada dos átomos de carbono de esta cadena principal, se encuentra ramificado un grupo metilo (CH_3). Debido a su característica asimétrica, se pueden distinguir tres formas isómeras del polipropileno, como se muestra en la Figura A1.7.

Éstas se diferencian por la posición de los grupos metilo con respecto a la estructura espacial de la cadena del polímero.

Los polímeros isotácticos poseen alta cristalinidad, así como estereoregularidad, requeridas para el procesamiento de plásticos y fibras. La forma atáctica, en cambio, no tiene ningún tipo de

cristalinidad. Debido a lo anterior, los procesos industriales más empleados están dirigidos hacia la fabricación de polipropileno isotáctico, cuyas propiedades se muestran en la Tabla A1.3.

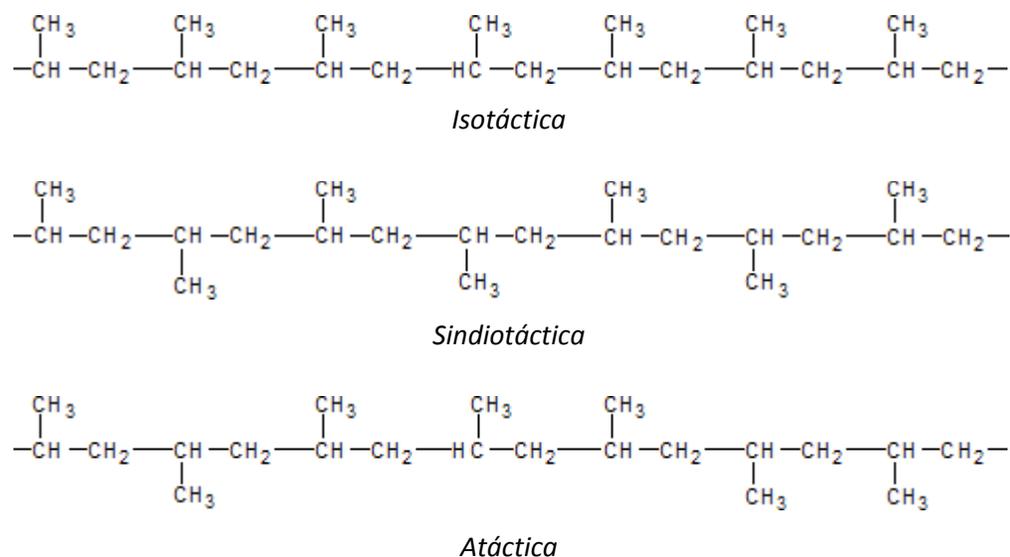


Figura A1.7. Estructuras espaciales del polipropileno. Fuente: *Garbulinski et al., 2006*

Tabla A1.3. Propiedades del polipropileno isotáctico. Fuente: *James, 1999*

Masa molecular, g/mol		100,000-600,000
Masa molecular de la unidad repetitiva, g/mol		42.07
Densidad, g/cm ³	Fase amorfa	0.850-0.855
	Material típico comercial	0.90-0.91
Temperatura de fusión, K		459
Temperatura de degradación, K		623

Aplicaciones del polipropileno (*Wells, 1991*)

El moldeo por inyección es la aplicación más importante del polipropileno, contabilizando del 30-35% de la demanda total. Los artículos moldeados son utilizados en envase, aparatos eléctricos, artículos para el hogar, muebles, juguetes y valijas. Debido a su resistencia y brillo, el polipropileno también se utiliza en los vehículos motorizados, para la envoltura de las baterías, conductos, acabados interiores y equipos de calefacción y aire acondicionado.

El polipropileno puede ser convertido en fibra, su resistencia lo ha llevado a reemplazar fibras naturales como el yute, el hilo y la cuerda, así como a ser aplicado para fabricar bolsas. El PP puede también hacerse película. La cinta de esta película es utilizada en el revés de las alfombras. Alrededor del 30% del polipropileno producido es utilizado para la manufactura de fibras y filamentos, mientras que 20% se utiliza para película (*Wells, 1991*).

El polipropileno puede ser extrudido y usado en la fabricación de tuberías y conductos, cables y alambres. Otra área de aplicación importante es el empaçado, donde el polipropileno se utiliza para contenedores y cierres.

El polipropileno atáctico tiene aplicación en los laminados de papel, selladores y aditivos.

Las fibras de polipropileno son empleadas para la producción de alfombras, tapices e hilos, entre otros. Para su elaboración, el material fundido es plastificado en una máquina extrusora y forzado a través de minúsculos orificios, formando las fibras. De modo semejante son producidos los tejidos de polipropileno, que son ampliamente utilizados en productos higiénicos desechables, ropas protectoras, etc.

Proceso de producción de polipropileno (*Wells, 1991*)

Los procesos comerciales de obtención de PP pueden clasificarse en tres grandes tipos:

- Procesos en suspensión o “slurry” en inglés
- Procesos en masa
- Procesos en fase gaseosa

En la actualidad muchas de las nuevas unidades de producción incorporan procesos híbridos, en los que se combina un reactor que opera en suspensión con otro que opera en fase gaseosa.

En la presente tesis se trabajó con el proceso de polimerización de propileno en suspensión.

En este proceso, propileno de 99.5% de pureza es alimentado de manera continua al reactor de polimerización que contiene el catalizador y el diluyente. El catalizador consiste en alquilos de aluminio con tricloruro de titanio en solución.

Varios hidrocarburos saturados de baja masa molecular pueden disolver poliolefinas. Si la temperatura es más alta que el punto de fusión del polímero y la concentración del polímero es baja, el polímero se mantendrá como una solución. Sin embargo, a temperaturas más bajas y concentraciones mayores, el polímero forma una suspensión. El uso de soluciones o mezclas como el medio de polimerización requiere temperaturas relativamente bajas (60-110°C), así como presiones relativamente bajas (1-5 MPa). En el caso del polipropileno, la reacción se lleva a cabo a una temperatura de 65-70°C y una presión de 1 a 3 MPa. Las partículas de polímero se encuentran suspendidas en el diluyente, formando una suspensión. El polímero atáctico que se llegara a formar se disuelve en el diluyente.

Los recipientes de reacción pueden ser reactores de tanque agitado utilizando solventes como el hexano o reactores de tubo refrigerados con solventes tales como el isopentano. En los reactores de suspensión, la concentración de la mezcla suele ser mantenida en ~25%. Las cámaras de asentamiento en la base del reactor, permiten remover el polímero de manera continua. El disolvente recuperado se reutiliza. El porcentaje de conversión de propileno a polipropileno puede llegar a ser de hasta 98%.

Al final de la reacción la mezcla es llevada a un tanque en el que se libera la presión y el propileno que no reaccionó es reciclado. La corriente del producto, que consiste en una suspensión del polímero, es lavada con alcohol etílico o agua para desactivar y remover el catalizador, así como también el polímero atáctico. Después de centrifugar para remover el solvente, el polipropileno obtenido en forma de finos gránulos se enjuaga con acetona o con alcohol isopropílico y se seca posteriormente. El polipropileno obtenido se mezcla con aditivos y puede ser comercializado en forma de polvo o “pelets”.

En algunos procesos, el polímero se separa de los residuos de catalizador por medio de extracción, evitando así la necesidad de la centrifugación. El uso de catalizadores de alta actividad elimina la necesidad de la extracción del mismo. La Figura A1.8 esquematiza este proceso (*Wells, 1991*).

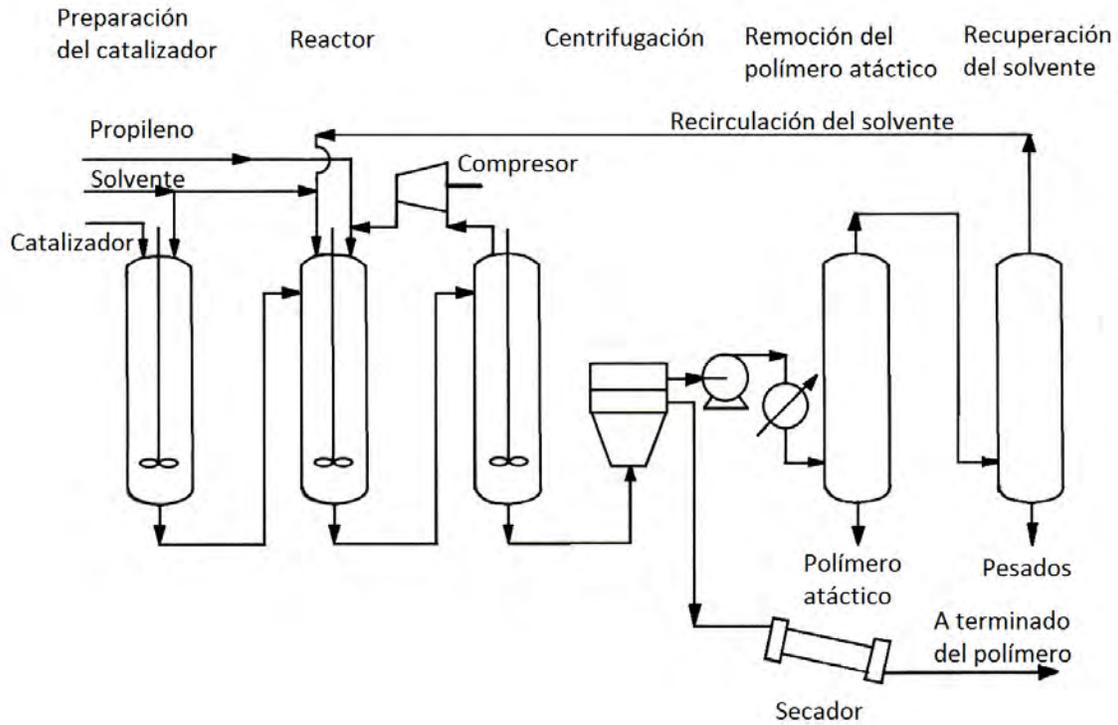


Figura A1.8. Polipropileno por polimerización en suspensión. Fuente: Wells, 1991

Comparación de los consumos de plásticos a nivel mundial (CEP, 2010; Frías et al., 2003)

Para tener una idea y sin profundizar en el mecanismo de los mercados, a continuación se muestra en la Tabla A1.4 el consumo mundial de plásticos en el 2006. En términos porcentuales, este consumo se mantiene de la misma manera en la actualidad.

La Figura A1.9 muestra la producción de polipropileno en México para los años 1993-2000 (Frías et al., 2003). En el caso del consumo y producción de los polietilenos, éste fue analizado en el capítulo correspondiente al Estudio de Caso.

ALGODÓN (SAGARPA, 2010)

El algodón es la planta textil de fibra suave más importante del mundo y su cultivo es de los más antiguos. La palabra algodón significaba tejido fino. El algodón fue el primer textil de la India. En

Tabla A1.4. Consumo mundial de plásticos en el 2006. Fuente: CEP, 2010

Plástico	Consumo (millones ton)
Poliétilenos	63.7
Polipropileno	40.7
Cloruro de polivinilo. (PVC)	30
Tereftalato de polietileno (PET)	12.3
Poliestireno	12.3
Resinas acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)	7
Otros termofijos	24
Otros	38
TOTAL	228

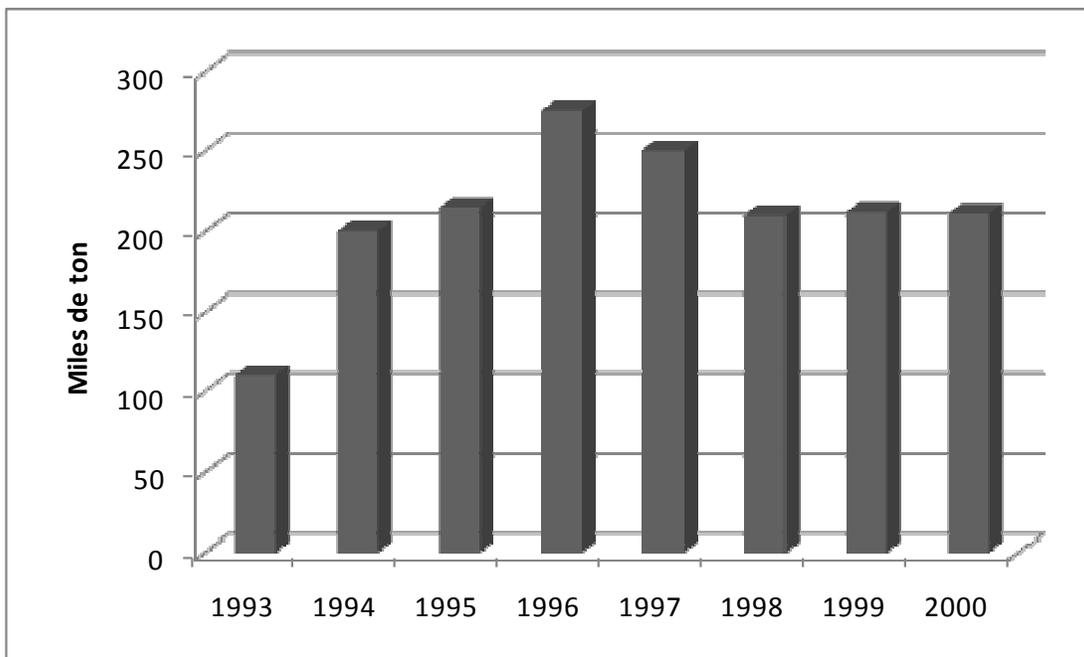


Figura A1.9. Producción de polipropileno en México. Fuente: Frías et al., 2003

México ya lo explotaban los pobladores indígenas.

El algodón pertenece a la familia Malvácea y al género *Gossypium* (G.). Existen cerca de 50 especies que comprenden este género. De todas estas especies, sólo cuatro se conocen con el nombre genérico de algodón: *G. hirsutum*, *G. barbadense*, *G. herbaceum* y *G. arboreum*.

La mayor parte del algodón cultivado deriva de dos especies: *G. hirsutum* (aproximadamente el 90% de la producción mundial), originario de América y *G. barbadense* (5% de la producción mundial, aproximadamente), también originario de América. Las dos restantes, han sido desplazadas y se cultivan regionalmente: *G. herbaceum*, cultivado principalmente en la India y *G. arboreum*, cultivado en zonas áridas de Asia y África.

Los especímenes más viejos de productos fabricados con algodón datan desde unos 3000 años A.C. Eran fragmentos de tejidos muy elaborados en la región norte de la costa peruana. A partir del año 800 D.C. se encuentran menciones de fibras y tejidos en los países orientales. Los árabes propagaron el algodón en los países mediterráneos y ese fue el origen de la industria del algodón en Barcelona.

En el siglo XVII Inglaterra se convirtió en un centro importante de producción de algodón. En Estados Unidos el algodón se introdujo en el Siglo XVIII y provenía de las regiones meridionales de América.

En México, los restos arqueológicos más antiguos de *G. hirsutum* datan de 3500 – 2300 años A.C., probablemente de formas domesticadas encontradas en cuevas del valle de Tehuacán, en el centro de México. Para el siglo XVI, se tenía una producción de 52,600 miles de toneladas (116 millones de libras), pero disminuyó al llegar los españoles. A partir de 1860 aumentó el interés en varias partes de México (SAGARPA, 2010).

Producción del algodón (SAGARPA, 2010)

El algodón es típico de zonas cálidas. Para su adecuado desarrollo requiere aproximadamente 160 días con temperaturas por encima de los 15°C y adecuada iluminación solar durante la época de crecimiento. Las regiones más adecuadas para el cultivo del algodón están localizadas a latitudes de entre 0 a 500 metros sobre el nivel del mar y, al cultivarse más allá de los 1,000 metros, los rendimientos y la calidad del producto resultan deteriorados. Los mejores suelos para su cultivo son aquellos que presentan una buena aireación, adecuada retención del agua y ricos en materia orgánica. Por esta razón, los suelos de tipo arenosos no son recomendables porque no retienen el

nivel de humedad requerido para el desarrollo de la planta; mientras que los de tipo arcilloso dificultan la germinación de la planta e incluso son causantes de enfermedades en ésta.

El pH del suelo deberá ser ligeramente ácido a casi neutro (6.2-7.2), que es el que más conviene al cultivo algodónero.

La semilla brota unos días después de la siembra y la floración comienza después de unos tres meses. La flor se desprende y el capullo empieza a crecer. Este adquiere su tamaño definitivo después de tres semanas y se abre en alrededor de 50 días después de su floración. Dentro del capullo, las semillas desarrollan las fibras antes de que abran. De las semillas emergen fibras largas, en tanto que otras más cortas (3 mm) la recubren a manera de vello.

La fibra de algodón es una prominencia unicelular que se desarrolla en la capa externa de la cubierta de la semilla.

El proceso de producción se inicia con la preparación del terreno, siembra, labores de riego, fertilización y control de plagas; 6 meses después se cosecha, la cosecha se hace en una o más recolecciones donde interviene un grupo de cosechadores. El producto cosechado en esta fase es la semilla cubierta por una fibra blanca y blanda, y se le denomina algodón hueso. La fertilización nitrogenada es esencial para el desarrollo y producción del cultivo. Con el objetivo de lograr un buen desarrollo vegetativo, compatible con la capacidad potencial de cada variedad de algodón respecto a las condiciones climáticas de la zona, es fundamental para el cultivo del algodón la regulación del nitrógeno. La regulación del nitrógeno se efectúa con las dosis y el momento de aplicación de los fertilizantes. Por su parte, el abonado de potasio incrementa la calidad de la fibra sobre todo en longitud y aumentando también la masa de la cápsula. En cambio, el abonado con fósforo aumenta en grosor la cápsula y hace que ésta abra más rápidamente.

Es importante también conocer el complejo de plagas e insectos que se desarrollan en el cultivo y así aplicar los herbicidas correspondientes.

El proceso de despepite es la separación mecánica de la fibra de algodón de la semilla. Con este proceso se da la conversión del algodón hueso en algodón pluma. Además, se tiene como subproducto la semilla de algodón. La fibra obtenida del despepite se destina en su mayor parte como insumo de la industria textil. El despepite se hace mediante un proceso mecánico-térmico-

neumático. Las despepitadoras tienen una serie de sierras metálicas circulares con dientes especialmente diseñados para ese trabajo.

Por su parte, la semilla es muy rica en aceite y proteínas. Al triturarla se obtiene aceite comestible, una vez eliminado el gossipol (pigmento tóxico que contiene la semilla).

La fibra de algodón queda como insumo para las siguientes opciones:

- Hilado
- Tejido
- Confección de prendas de vestir

En la industria textil, la fibra pasa por un proceso de cardado y peinado, del cual se obtiene la mecha. Posteriormente, se da el proceso de hilandería, en donde se reduce la mecha al grado de finura, tensión y torsión convenientes. El hilo se enrolla en conos y es enviado al proceso de teñido y tejido, de donde se obtiene la tela que finalmente será utilizada para la confección de prendas de vestir.

Consumo del algodón (*Arredondo, 2000; SAGARPA, 2010*)

Los productos de mayor consumo en el país son las telas de poliéster-algodón. En la actualidad, la producción nacional de algodón ha disminuido debido al abandono del campo, a la falta de créditos y a la apertura comercial (*Arredondo, 2000*).

Las principales regiones algodonerías de México se encuentran en Baja California, Chihuahua, Coahuila y Durango (Comarca Lagunera), Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, así como otras en menor escala: Campeche y Chiapas. La Comarca Lagunera presenta el rendimiento más alto.

En el ciclo 97/98, el consumo en México fue de 2.2 millones de pacas de algodón, mientras que la producción fue de 960,000 pacas, teniéndose que importar la diferencia para satisfacer el consumo. Esto puso al país como un importador de esta fibra, principalmente de Estados Unidos.

En el periodo 2009/2010, la producción de algodón se distribuyó de la siguiente manera: China fue el principal productor en el mundo, con una participación de 32%; le sigue la India con 23%; EE.UU., 12%, Pakistán con 9%, Brasil con 5% y Uzbekistán con 4%. La producción de México representa poco menos de 0.5% del total de la producción mundial. Esto se puede observar en la Figura A1.10.

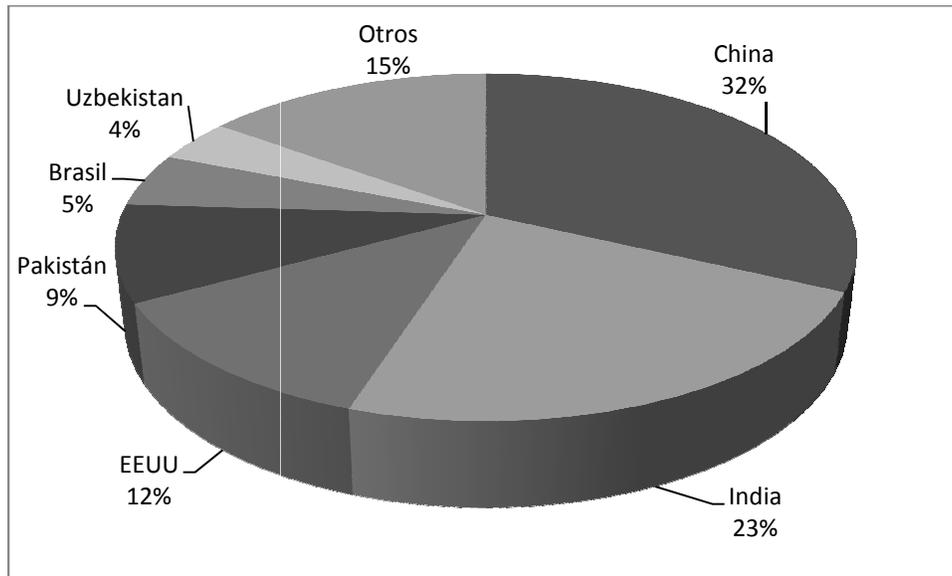


Figura A1.10. Participación en la producción mundial de algodón, periodo 2009/2010. Fuente: SAGARPA, 2010

Estados Unidos es el principal país exportador de algodón en el mundo. Moviliza el 34% del total mundial, casi el doble del volumen que el segundo exportador, India, país cuyas exportaciones representan el 18% del total. En tercer lugar, se encuentra Uzbekistán, con 10% del total; seguido por Australia, Brasil, Turkmenistán y Grecia. Estos países participan con el 6, 5, 3 y 3% de volumen mundial de exportación de algodón, respectivamente.

En lo que respecta a las importaciones, China es el principal importador mundial, con el 31% del volumen mundial; Turquía con 12%, ocupa el segundo lugar, aunque por un estrecho margen de diferencia, del tercer lugar Bangladesh con 11%. Continúan en la lista Indonesia, Tailandia y Vietnam, con 6, 5.1 y 4.7%, respectivamente. México importa el 4% de las importaciones mundiales de algodón.

En cuanto a la producción estatal de algodón hueso en el 2009, se concentró en los estados del norte del país. Chihuahua, produce el 40% del total de algodón en México. En segundo y tercer lugares, se encuentran Baja California con el 25% del total y, muy cerca, Coahuila con el 23%. Siguen en la lista, Durango y Sonora, con 6% cada uno.

Se estima que el consumo de algodón en México para el ciclo 2009/10, será cercano a 420 mil toneladas. Para satisfacer dicho volumen es necesario complementar la producción con importaciones.

La composición por países de origen de las importaciones de algodón en México, no han variado significativamente. En el año 2000, EEUU proveía el 97% de las importaciones totales de algodón, volumen que en el año 2009, alcanzó el 99%. Sin embargo, la tendencia de las importaciones ha venido a la baja, desde el año 2003, se ha reducido, al pasar de 463 mil toneladas a 301 mil toneladas de algodón, en 2009.

El nivel de precios del algodón en México está fuertemente ligado a las fluctuaciones del precio internacional, particularmente el de los Estados Unidos. A partir del 2009, la diferencia de precios (EEUU vs. México) se ha venido reduciendo. En noviembre de 2009, alcanzó un monto superior a \$4,000 de diferencia, mientras que para octubre de 2010, la diferencia fue de apenas \$650 masas por tonelada.

PAPEL TIPO KRAFT (*Jiménez, 2005*)

El papel es un material de pequeño espesor formado por el entrecruzamiento de fibras vegetales a partir de una suspensión acuosa pastosa denominada pulpa, obtenida por diversos métodos a partir de materias vegetales fibrosas (provenientes directamente de dichas fuentes o de material reciclado).

Las fibras del papel están unidas tanto físicamente, por estar entrelazadas a modo de malla, como químicamente por puentes de hidrógeno.

La obtención de la pulpa de papel a partir de las materias vegetales se puede llevar a cabo de muy distintas formas, según la aplicación final y sobre todo de la materia prima. Antiguamente, las

materias primas eran exclusivamente telas y trapos viejos, procesados costosamente y convertidos en papel de características heterogéneas. Debido a la escasez de estos recursos, y a partir del descubrimiento de los procesos que utilizaban madera de árbol como materia prima, los procesos de obtención de pulpa fueron totalmente modificados.

Para la obtención del papel, es necesaria la obtención de la suspensión de fibras celulósicas con unas características determinadas en cuanto a tamaño de fibras, distribución de tamaños, composición, flexibilidad, resistencia, etc. Para obtener estas características, se aplican sobre las materias primas diferentes procedimientos encaminados a obtener una pulpa de características adecuadas, tratando siempre de obtener el mayor rendimiento posible.

En cuanto a la producción nacional, la industria mexicana no cubre la demanda de papel tipo Kraft, principalmente por la apertura de fronteras con Estados Unidos y Canadá, ya que estos países ofrecen productos de la misma calidad a un menor precio en el mercado del papel. Las importaciones de papel tipo Kraft para el periodo 1995-2000 se encuentran en la Figura A1.11.

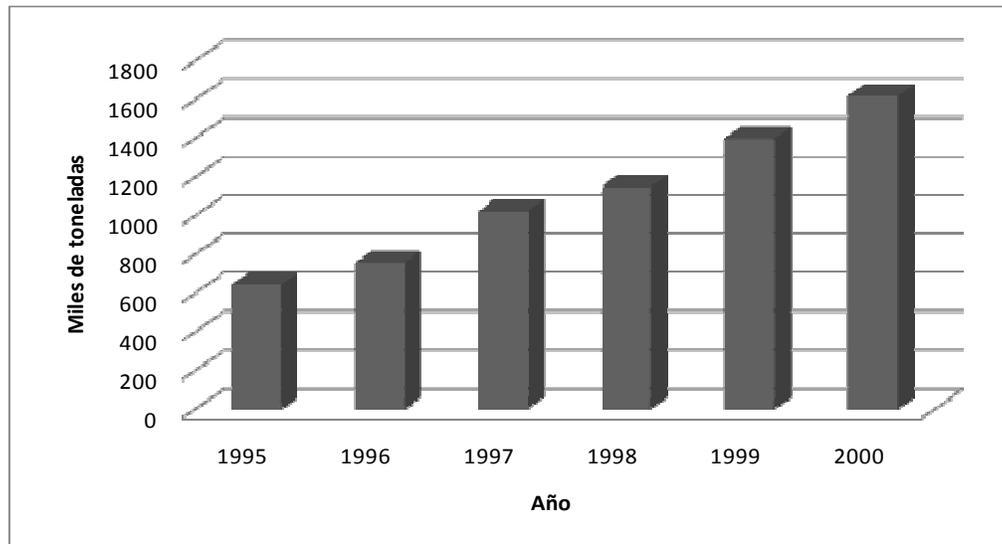


Figura A1.11. Importación total de papel tipo Kraft. Fuente: Jiménez, 2005

Estructura de la madera (*Martínez y Vignote, 2006*)

Las fibras vegetales requeridas para la producción de papel están compuestas por largas cadenas de un polímero natural, la celulosa. La fórmula molecular de la celulosa se puede expresar como $(C_6H_{10}O_5)_n$, siendo n el número de unidades que forman la cadena. Las fibras utilizables para fabricar papel, suelen presentar un diámetro de entre 10 y 40 μm , y su longitud se sitúa entre 0.5 y 30 mm.

Las propiedades que hacen de la fibra celulósica el material idóneo para la confección del papel son las siguientes:

- Gran resistencia mecánica a tensión
- Buena flexibilidad, natural y adquirida
- Resistencia a la deformación plástica
- Hidrofilia
- Amplio rango de dimensiones
- Facilidad inherente a enlazarse
- Facilidad para absorber aditivos modificantes
- Estable químicamente
- Relativamente incolora

En la estructura de la madera también aparecen otro tipo de fibras con base en polisacáridos, denominadas hemicelulosa y lignina. Las longitudes de la hemicelulosa son menores que las de la celulosa y las unidades de que están formados son diferentes: glucosa, manosa, galactosa, xylosa y arabinosa, dependiendo de la planta considerada.

Tanto las fibras de celulosa como las de hemicelulosa están unidas entre sí por una sustancia polimérica de estructura amorfa denominada lignina, la cual actúa como unión de las mencionadas fibras, dando consistencia y rigidez a la planta. La lignina se sitúa formando una capa externa alrededor de las fibras, y dicha capa externa se une a la existente en las demás fibras por medio de enlaces covalentes y de puente de hidrógeno. La estructura química de la lignina es extremadamente complicada, pero se basa en la unión tridimensional de unidades de fenilpropano, cuyos sustituyentes varían en función de la planta considerada. Las uniones entre los

monómeros han de ser quebradas para poder separar las fibras celulósicas necesarias en la obtención de la pulpa.

Además de los anteriores componentes, existen en las maderas pequeñas cantidades de otros materiales de diferente naturaleza, los cuales son fácilmente extraídos durante el procesado de la pasta de papel: terpenos, resinas, fenoles, ácidos grasos, etc. Su porcentaje varía de unas maderas a otras (entre 2 y 8%).

Fabricación de papel tipo Kraft (Jiménez, 2005)

El proceso Kraft, también conocido como pulpeo Kraft o pulpeo al sulfato, es usado en la producción de pulpa de celulosa. Su nombre deriva del alemán *Kraft*, que significa "fuerza". Fue desarrollado por el sueco Carl Dahl en 1879 y actualmente se usa para el 80% del papel producido a nivel mundial. A continuación se describe de manera breve el proceso.

Lavado de la madera: este tratamiento se realiza mediante aspersion de agua a presión para tratar de retirar cualquier partícula adherida a la madera, de forma natural o durante el transporte, para evitar impurezas en la línea de proceso.

Descortezado de madera: los troncos son llevados a unos grandes cilindros huecos giratorios. El rozamiento que se produce entre ellos y entre los troncos y la pared interior del cilindro, hace que la corteza se separe del núcleo del tronco. La importancia de esta operación radica en que la cantidad de corteza que debe utilizarse tiene que ser mínima, ya que produce un efecto debilitador indeseable en la pasta de papel. Durante este proceso se pierde una mínima fracción de madera.

El objetivo que se busca en esta parte del proceso es la separación de las fibras de celulosa que constituyen el núcleo del tronco. Para ello se deben romper las uniones entre fibras constituidas por lignina y otros elementos. Una vez acondicionada la madera, se introduce en la unidad correspondiente para separar las fibras que constituyen el esqueleto de la madera.

A continuación se lleva a cabo el proceso de batido, cuyo objeto es separar las fibras de celulosa o desperdicios y formar una suspensión homogénea. Para ello se emplean molinos desintegradores

en forma de taza, que comercialmente reciben el nombre de “hidropulpers” y poseen un desintegrador o propela en el fondo. El fondo del “hidropulper”, alrededor de la propela, está formado por una criba con orificios de 1/8” a fin de dejar pasar únicamente el papel que ya se ha desfibrado. En este equipo se trabaja con cargas intermitentes, recirculando la pasta a un refinador cónico de cuchillas anchas a una concentración de sólidos de 5% y diluyéndola al 3% antes de bombearla al tanque de “hidropulper”.

De los “hidropulper”, la pasta se bombea a los reguladores de consistencia. Estos son pequeños tanques divididos en tres compartimentos, la pasta se alimenta al compartimento central y por uno de los compartimentos laterales se descarga a los refinadores por un orificio con compuerta, mientras que en el otro compartimento rebosa el exceso de pasta, que es enviado de nuevo al “hidropulper”.

Los refinadores o “jordans” reciben la pasta por gravedad directamente de los reguladores de consistencia. Estos refinadores son del tipo cónico, con cuchillas de acero. A la descarga de los refinadores se colocan válvulas para controlar la cantidad de pasta que pasa a los tanques de pasta refinada. Los tanques de pasta refinada son de la misma forma y capacidad que los “hidropulpers”.

También se puede realizar lo anterior mediante: procesos semiquímicos, en los que se utiliza una combinación de tratamientos mecánicos con la adición de ciertos reactivos químicos que aceleran y optimizan la separación. O bien, por medio de procesos químicos, los cuales están basados en tratamientos puramente químicos, adicionando a la madera sustancias que producen por sí solas la separación de la lignina de la celulosa. Normalmente son llevados a cabo a alta temperatura y presión.

La madera reducida a la granulometría adecuada se cuece en un gran recipiente a presión añadiéndole diversos productos químicos tales como sosa cáustica, bisulfito de sodio y vapor de agua.

Proceso de laminación de la pasta en máquina: consiste en poner las fibras en una suspensión acuosa con consistencias comprendidas entre 4 y 12 g/L para que puedan unirse convenientemente y, posteriormente, secarse por sistemas gravimétricos, mecánicos y térmicos para obtener una lámina de papel con una proporción de humedad comprendida entre el 7 y el 9%.

Los agentes activos en el proceso son el sulfuro de sodio y el hidróxido de sodio. Las reacciones que tienen lugar durante la digestión Kraft no son totalmente conocidas, ya que la multiplicidad de compuestos presentes en el medio reactivo, y la complejidad de la lignina dificultan la determinación de las reacciones cruciales para la velocidad global; pero se sabe que la presencia de sulfuros acelera la disolución de la lignina sin que aumente la degradación de la celulosa.

Durante la digestión es importante una perfecta mezcla en el interior del reactor, ya que de lo contrario la cocción sería desigual en todo el volumen y el producto final sería heterogéneo, lo que se traduce en un elevado rechazo de la fracción de pulpa de tamaño más grueso en la etapa de cernido, lo que supone un aumento en el costo del proceso. Es por ello que la convección natural no es suficiente para obtener el grado de mezcla deseado, y se recurre a la convección forzada, inducida por la reducción súbita de presión en la parte alta del digestor.

Es necesario calentar el digestor por vaporización directa hasta llegar a temperaturas de entre 160 y 180°C, manteniéndose estas condiciones hasta alcanzar el grado deseado de cocción. Una vez terminada la cocción la mezcla de pulpa y astillas no digeridas salen del digestor y se separan por cernido, siendo devueltas al digestor las partículas de mayor tamaño. Se separa la pulpa que, a continuación, pasa a una etapa de lavado.

El licor gastado, denominado licor negro, se pasa al ciclo de regeneración; allí, se mezcla con sulfato de sodio y se oxida, para evitar olores indeseables (provenientes de compuestos sulfurosos). Una vez oxidado se incinera en un horno de recuperación, produciéndose una ceniza que contiene las sales de sodio (carbonato y sulfuro), las cuales se caustifican agregando cal apagada (hidróxido de calcio); de aquí se obtiene carbonato de calcio, que se regenera a cal viva por combustión. Además, el calor generado en los hornos se aprovecha para calentar la caldera, precalentar el vapor y para evaporar disolvente de la etapa de concentración del licor negro.

El color de las pulpas obtenidas en este proceso es más oscuro que el color de aquellas obtenidas mediante otros procesos, por lo que no pueden ser empleadas para fabricar papel de impresión. Estas pulpas sin blanquear se utilizan para la fabricación de papel de envolver y cartón, debido a su gran resistencia.

En la industria de la celulosa y el papel, los procesos de cocción y blanqueo son altamente contaminantes; además, la materia prima principal (madera), se ha explotado de manera irracional

en muchos lugares, poniendo en peligro la conservación de las especies de esos hábitats, ya que no se resiembran los árboles talados, como en cualquier explotación de recursos naturales renovables.

También se hace presente en estos procesos la contaminación del agua, que es la introducción en el agua de sustancias que por sus características y proporción alteran la calidad natural y perjudican su utilidad (Jiménez, 2005).

Entre los principales compuestos tóxicos no volátiles presentes en la obtención de la pulpa se encuentran las resinas ácidas, incluyendo el ácido abiótico isoprimárico, palústrico, primárico, sandaracoprimárico y neoabiético: ácidos grasos insaturados como el oleico, linoleico y palmitoleico; resinas cloradas, incluidos el monocloro y dicloro dehidroabiético. Los compuestos volátiles de azufre, tales como el sulfuro de hidrógeno, metil mercaptano y dimetilsulfuro, también contribuyen a la toxicidad de los efluentes de las fábricas tipo Kraft.

Muchos de los procesos utilizados para convertir la madera en pulpa, papel y cartón son fuentes de contaminación atmosférica. Sustancias como los mercaptanos, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno son emitidos por estos procesos. Otro aspecto de la contaminación del aire por estos procesos, se debe a la emisión de partículas, siendo la principal fuente los procesos de combustión. Las partículas normalmente tienen un diámetro de 0.01 a 1.0 mm y tiempos de residencia en la atmósfera de 7 a 40 días (Jiménez, 2005). El diagrama de bloques de la producción de papel tipo Kraft se presenta en la Figura A1.12. Todos estos factores fueron considerados en la evaluación correspondiente.

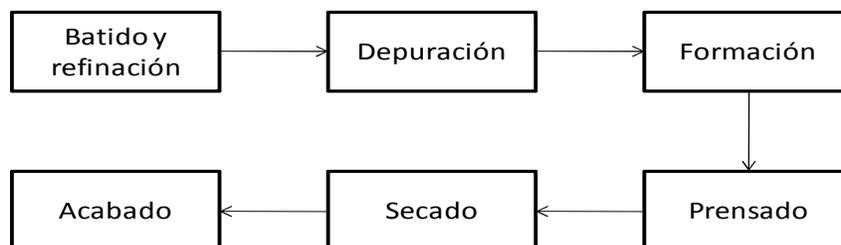


Figura A1.12. Representación de las principales operaciones que se realizan en la elaboración de papel tipo Kraft. Fuente: Jiménez, 2005

APÉNDICE II

MEMORIA DE CÁLCULO

Este apéndice presenta la memoria de los cálculos realizados para los balances de materia, de energía y de exergía. También se presenta el cálculo de las emisiones y el del valor del producto para cada uno de los materiales abordados en la presente tesis.

Como se mencionó en la metodología, se analiza la cadena de producción de los materiales, partiendo desde la materia prima básica. En el caso de los productos provenientes de fuentes fósiles, se comienza a considerar a partir de petróleo crudo, o bien, gas natural húmedo, según sea el caso. Por lo anterior se deben conocer las entradas y salidas de cada bloque de proceso considerado en la cadena de producción a analizar.

A2.1 Balances y cálculos para el polietileno de baja densidad (PEBD), obteniendo el etileno a partir de un centro procesador de gas (CPG) de México (PEMEX 2009a,b; PEP, 1998; SimaPro 2010)

- **Balance de materia para una tonelada de PEBD:**

A continuación se esquematiza de manera simple la cadena de producción de polietileno de baja densidad, partiendo de gas natural húmedo. Ver Figura A2.1.

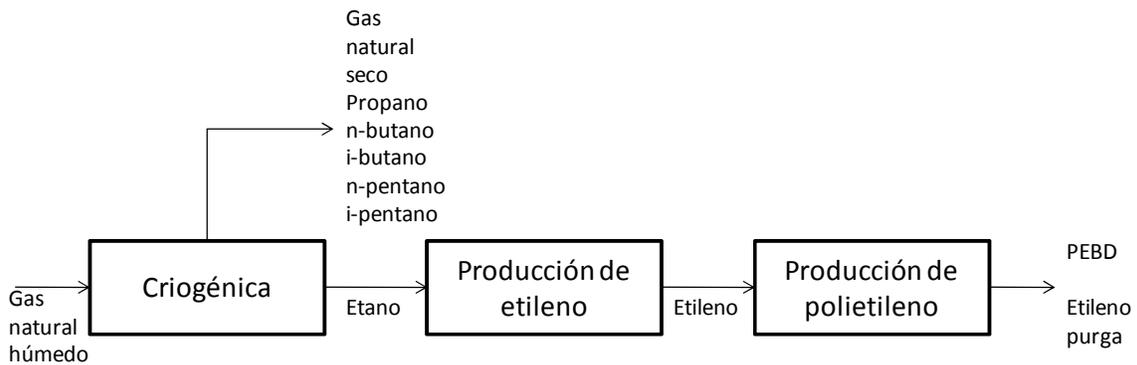


Figura A2.1. Cadena de producción de polietileno de baja densidad a partir de GNH (el eteno se conoce coloquialmente como etileno)

Como base de cálculo, se parte de una tonelada de producto final, en este caso el PEBD. Por medio de la literatura se conoce la razón insumo-producto, la cual se aplica para conocer la cantidad de materia prima necesaria en el proceso de polimerización. Posteriormente, el proceso anterior en la cadena, corresponde a la producción de etileno a partir de etano; de la misma manera se aplica la relación de insumo-producto correspondiente:

$$\left(\frac{1.06 \text{ ton etileno}}{1 \text{ ton PEBD}}\right) \left(\frac{1.234201 \text{ ton etano}}{1 \text{ ton etileno}}\right) = 1.308253 \frac{\text{ton etano}}{\text{ton PEBD}}$$

Para calcular el gas natural húmedo requerido para obtener la cantidad necesaria de etano, se utiliza el promedio del rendimiento de las tres criogénicas del Centro Procesador de Gas “Nuevo Pemex”, en el cual por una entrada de un millón de ft³ de gas natural húmedo se obtienen 38.39 barriles de etano, como se indica a continuación:

$$\left(38.39 \frac{\text{bl etano}}{\text{MMft}^3 \text{GNH}}\right) \left(0.15899 \frac{\text{m}^3}{\text{bl}}\right) \left(428.27 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = 2\,614 \frac{\text{kg etano}}{\text{MMft}^3 \text{Gas natural húmedo}}$$

$$\left(\frac{1 \text{ MM ft}^3 \text{GNH}}{2.614 \text{ ton etano}}\right) \left(\frac{1.30825306 \text{ ton etano}}{\text{ton PEBD}}\right) = 500\,479.37 \frac{\text{ft}^3 \text{GNH}}{\text{ton PEBD}}$$

$$(500\,479.37 \text{ft}^3 \text{GNH}) \left(\frac{1 \text{blpce}^*}{5000 \text{ft}^3}\right) = 100.096 \text{blpce}$$

$$(100.096 \text{blpce}) \left(\frac{5960 \text{ MJ}}{1 \text{blpce}^*}\right) = 596\,571.42 \text{ MJ}_{eq}$$

donde:

La densidad del etano es de 428.27 kg/m³

GNH = Gas natural húmedo

blpce = barriles de petróleo crudo equivalente

El poder calorífico promedio de un barril de crudo corresponde a 5 960 MJ

Lo anterior indica que para obtener una tonelada de polietileno de baja densidad se necesita una entrada a la cadena de producción de 500,479.37 ft³ de gas natural húmedo.

La cantidad necesaria para la unidad funcional es de 5.04 kg de PEBD, por lo tanto se requieren

$$\left(500\,479.37 \frac{\text{ft}^3 \text{GNH}}{\text{ton PEBD}}\right) \left(\frac{5.04 \text{ kg}}{\text{u. f.}}\right) \left(\frac{1 \text{ ton PEBD}}{1000 \text{ kg PEBD}}\right) = 2\,522.42 \frac{\text{ft}^3 \text{GNH}}{\text{u. f. (PEBD)}}$$

- **Balance de energía para una tonelada de PEBD:**

Para producir una tonelada de PEBD se tiene un consumo de electricidad de 941 kWh en el proceso de polimerización, como se muestra a continuación:

$$\left(\frac{941 \text{ kWh}}{\text{ton PEBD}}\right) \left(\frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}}\right) \left(\frac{1 \text{ MJ}}{1000 \text{ kJ}}\right) = 3387.6 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEBD}}$$

Mientras que la cantidad de energía necesaria en el proceso de producción de etileno es:

Consumo de electricidad:

$$\begin{aligned} \left(\frac{29 \text{ kWh}}{\text{ton etileno}}\right) \left(\frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}}\right) \left(\frac{1 \text{ MJ}}{1000 \text{ kJ}}\right) &= 104.4 \frac{\text{MJ}}{\text{ton etileno}} \left(\frac{1.06 \text{ ton etileno}}{\text{ton PEBD}}\right) \\ &= 110.664 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEBD}} \end{aligned}$$

Consumo de gas natural:

$$3301 \text{ Mcal} \left(\frac{4.186 \text{ MJ}}{1 \text{ Mcal}}\right) = 13817.986 \frac{\text{MJ}}{\text{ton etileno}} \left(\frac{1.06 \text{ ton etileno}}{\text{ton PEBD}}\right) = 14647 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEBD}}$$

Para conocer la energía necesaria para la transformación de gas natural húmedo a etano, se tomó como referencia la energía consumida en el CPG "Nuevo Pemex", México, en el año 2009 (PEMEX, 2009):

$$8429074 \text{ Gcal} \left(\frac{4.186 \text{ GJ}}{1 \text{ Gcal}}\right) = 35284103.76 \text{ GJ}$$

Ahora lo relacionamos con el procesamiento de gas natural que hubo en ese año en ese centro:

$$35284103.76 \text{ GJ} / 240170 \text{ millones } ft^3 \text{ GNH} = 0.14691304 \frac{\text{MJ}}{ft^3 \text{ de GNH procesado}}$$

Entonces se relaciona con la cantidad de gas natural necesario para una tonelada de polietileno de baja densidad:

$$\left(0.14691304 \frac{\text{MJ}}{ft^3 \text{ de GNH}}\right) \left(\frac{500479.37 \text{ } ft^3 \text{ de GNH}}{\text{ton PEBD}}\right) = 73193.11 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEBD}}$$

Por lo tanto el consumo de energía en el ciclo de producción de polietileno de baja densidad es:

$$3\,387.6 \frac{MJ}{ton\ PEBD} + 110.664 \frac{MJ}{ton\ PEBD} + 14\,647 \frac{MJ}{ton\ PEBD} + 73\,193.11 \frac{MJ}{ton\ PEBD} \\ = 91\,338.37 \frac{MJ\ TOTALES}{ton\ PEBD}$$

La cantidad requerida de energía para la unidad funcional de 5.04 kg de PEBD es:

$$\left(91\,338.37 \frac{MJ\ TOTALES}{ton\ PEBD}\right) \left(\frac{5.04\ kg}{u.f.}\right) \left(\frac{1\ ton\ PEBD}{1000\ kg\ PEBD}\right) = 460.35 \frac{MJ}{u.f.(PEBD)}$$

- **Emisiones resultantes de la fabricación de una tonelada de PEBD:**

La cantidad de emisiones de CO₂, en la fabricación de PEBD se obtuvo del programa de cómputo SimaPro 7.2, y corresponde a: 2.8062 kg/kg PEBD. Este dato comprende únicamente el proceso de polimerización.

Como en el caso del balance de energía, se utilizan como base las emisiones de CO₂ generadas en el CPG “Nuevo Pemex” de México en el año 2009 (PEMEX, 2009a,b):

$$2\,306\,875\ ton\ CO_2$$

Ahora si se relaciona con el procesamiento de gas natural que hubo en ese año en ese centro:

$$\frac{2\,306\,875\ ton\ CO_2}{241\,265\ millones\ ft^3\ GNH} = 9.65 \times 10^{-6} \frac{ton\ CO_2}{ft^3\ de\ GNH\ procesado}$$

Entonces se relaciona con la cantidad de gas natural necesario para una tonelada de polietileno de baja densidad:

$$\left(9.65 \times 10^{-6} \frac{ton\ CO_2}{ft^3\ de\ GNH}\right) \left(\frac{500\,479.37\ ft^3\ de\ GNH}{ton\ PEBD}\right) = 4.7846 \frac{ton\ CO_2}{ton\ PEBD}$$

Las emisiones totales del ciclo de vida para la producción de una tonelada de PEBD:

$$2.8062 \frac{ton\ CO_2}{ton\ PEBD} + 4.7846 \frac{ton\ CO_2}{ton\ PEBD} = 7.6134 \frac{ton\ CO_2}{ton\ PEBD}$$

A2.2 Balances y cálculos para el polietileno de alta densidad (PEAD), obteniendo el etileno a partir de un centro procesador de gas (CPG) de México (PEMEX 2009a, PEP, 1998; SimaPro 2010)

- **Balance de materia para una tonelada de PEAD:**

El esquema de la cadena de producción seguida para la fabricación de PEAD a partir de gas natural húmedo se presenta a continuación en la Figura A2.2.

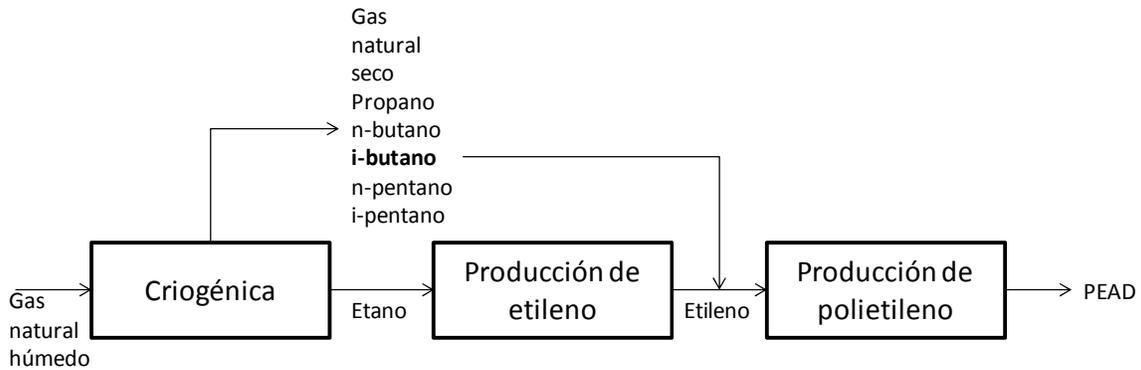


Figura A2.2. Cadena de producción de polietileno de alta densidad a partir de GNH (el eteno es conocido coloquialmente como etileno)

Los cálculos se realizan siguiendo el procedimiento descrito en el caso anterior, aplicándolo ahora a los procesos involucrados en la manufactura de PEAD.

$$\left(\frac{1.025 \text{ ton etileno}}{\text{ton PEAD}}\right) \left(\frac{1.234201 \text{ ton etano}}{\text{ton etileno}}\right) = 1.265056025 \frac{\text{ton etano}}{\text{ton PEAD}}$$

En este proceso se requiere también isobutano. La cantidad necesaria para una tonelada de PEAD es 0.021591. Este isobutano se obtiene de la planta criogénica, al igual que el etano.

Ahora se calcula el gas natural húmedo requerido para obtener esta cantidad de etano:

$$\left(38.39 \frac{\text{bl etano}}{\text{MMft}^3 \text{GNH}}\right) \left(428.27 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(0.15899 \frac{\text{m}^3}{\text{bl}}\right) = 2\,614 \frac{\text{kg etano}}{\text{MMft}^3 \text{Gas natural húmedo}}$$

$$\left(\frac{1 \text{ MM ft}^3 \text{GNH}}{2.614 \text{ ton etano}}\right) \left(\frac{1.265056025 \text{ ton etano}}{\text{ton PEAD}}\right) = 483\,954.11 \frac{\text{ft}^3 \text{GNH}}{\text{ton PEAD}}$$

$$(483\,954.11 \text{ ft}^3 \text{GNH}) \left(\frac{1 \text{ blpce}^*}{5000 \text{ ft}^3} \right) = 96.79 \text{ blpce}$$

$$(96.79 \text{ blpce}) \left(\frac{5960 \text{ MJ}}{1 \text{ blpce}^*} \right) = 576\,873.3 \text{ MJ}_{eq}$$

Lo anterior indica que para obtener una tonelada de polietileno de alta densidad se necesita una entrada a la cadena de producción de 483,954.11 ft³ de gas natural húmedo.

Y la cantidad necesaria de GNH para obtener 0.021591 toneladas de isobutano, que es la cantidad de i-butano necesaria para fabricar 1 tonelada de PEAD, corresponde a:

$$\left(5.32 \frac{\text{bl i-butano}}{\text{MMft}^3 \text{GNH}} \right) \left(480.88 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(0.15899 \frac{\text{m}^3}{\text{bl}} \right) = 406.74 \frac{\text{kg i-butano}}{\text{MMft}^3 \text{Gas natural húmedo}}$$

$$\left(\frac{1 \text{ MM ft}^3 \text{GNH}}{0.40674 \text{ ton i-butano}} \right) \left(\frac{0.021591 \text{ ton i-butano}}{\text{ton PEAD}} \right) = 53\,082.9 \frac{\text{ft}^3 \text{GNH}}{\text{ton PEAD}}$$

Como esta cantidad no supera los ft³ de gas natural requeridos para obtener el etano necesario, no se necesita una cantidad mayor a éstos.

La cantidad necesaria para la unidad funcional es de 5.04 kg de PEAD, por lo tanto se requieren

$$\left(483\,954.11 \frac{\text{ft}^3 \text{GNH}}{\text{ton PEAD}} \right) \left(\frac{5.04 \text{ kg}}{\text{u. f.}} \right) \left(\frac{1 \text{ ton PEAD}}{1000 \text{ kg PEAD}} \right) = 2\,439.13 \frac{\text{ft}^3 \text{GNH}}{\text{u. f. (PEAD)}}$$

- **Balance de energía para una tonelada de PEAD:**

La polimerización de etileno a PEAD consume una cantidad de electricidad de 282 kWh:

$$\left(\frac{282 \text{ kWh}}{\text{ton PEAD}} \right) \left(\frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}} \right) \left(\frac{1 \text{ MJ}}{1\,000 \text{ kJ}} \right) = 1\,015.2 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEAD}}$$

Así como un consumo de gas natural de:

$$44 \text{ Mcal} \left(\frac{4.186 \text{ MJ}}{1 \text{ Mcal}} \right) = 184.184 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEAD}}$$

Como en este proceso la cantidad de etileno requerida es menor a la requerida para la obtención de PEBD, la cantidad de energía necesaria en el proceso de producción de etileno, referida a una tonelada de PEAD se obtiene como se muestra a continuación.

Consumo de electricidad:

$$\left(\frac{29 \text{ kWh}}{\text{ton etileno}}\right) \left(\frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}}\right) \left(\frac{1 \text{ MJ}}{1000 \text{ kJ}}\right) = 104.4 \frac{\text{MJ}}{\text{ton etileno}} \left(\frac{1.025 \text{ ton etileno}}{\text{ton PEAD}}\right)$$

$$= 107.01 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEAD}}$$

Consumo de gas natural:

$$3301 \text{ Mcal} \left(\frac{4.186 \text{ MJ}}{1 \text{ Mcal}}\right) = 13817.986 \frac{\text{MJ}}{\text{ton etileno}} \left(\frac{1.025 \text{ ton etileno}}{\text{ton PEAD}}\right) = 14163.4 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEBD}}$$

Anteriormente se calculó el consumo de energía por unidad procesada en el CPG “Nuevo Pemex” de México en el año 2009. Este dato se relaciona con la cantidad de gas natural necesario para una tonelada de polietileno de alta densidad:

$$\left(0.146246 \frac{\text{MJ}}{\text{ft}^3 \text{ de GNH}}\right) \left(\frac{483954.11 \text{ ft}^3 \text{ de GNH}}{\text{ton PEAD}}\right) = 70776.35 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEAD}}$$

Por lo tanto, el consumo de energía en el ciclo de producción de polietileno de alta densidad es:

$$1015.2 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEAD}} + 184.184 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEAD}} + 107.01 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEAD}} + 14163.4 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEAD}}$$

$$+ 70776.35 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEAD}} = 86246.15 \frac{\text{MJ TOTALES}}{\text{ton PEAD}}$$

La cantidad requerida de energía para la unidad funcional de 5.04 kg de PEBD es:

$$\left(86246.15 \frac{\text{MJ TOTALES}}{\text{ton PEAD}}\right) \left(\frac{5.04 \text{ kg}}{\text{u.f.}}\right) \left(\frac{1 \text{ ton PEAD}}{1000 \text{ kg PEAD}}\right) = 434.68 \frac{\text{MJ}}{\text{u.f. (PEAD)}}$$

- **Emisiones resultantes de la fabricación de una tonelada de PEAD:**

De la misma manera que para el PEBD, se calculan las emisiones de CO₂. Para el proceso de fabricación de PEAD corresponden a: 1.567 kg/kg PEAD. Este dato comprende únicamente el proceso de polimerización. Fuente: SimaPro 7.2 (2010).

De cálculos anteriores se conocen las emisiones del CPG “Nuevo Pemex” de México, se relaciona con la cantidad de gas natural necesario para una tonelada de polietileno de alta densidad:

$$\left(9.56 \times 10^{-6} \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ft}^3 \text{ de } GNH}\right) \left(\frac{483\,954.11 \text{ ft}^3 \text{ GNH}}{\text{ton PEAD}}\right) = 4.6266 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton PEAD}}$$

Por lo tanto, las emisiones totales del ciclo de vida para la producción de una tonelada de PEAD corresponden a:

$$1.567 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton PEAD}} + 4.6266 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton PEAD}} = 6.2154 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton PEAD}}$$

A2.3 Balances y cálculos para el polipropileno (PP) (PEMEX 2009a,b; PEP, 1998; SimaPro 2010)

La cadena completa de producción de polipropileno, como se analizó en esta tesis, se representa de forma esquemática en la Figura A2.3.

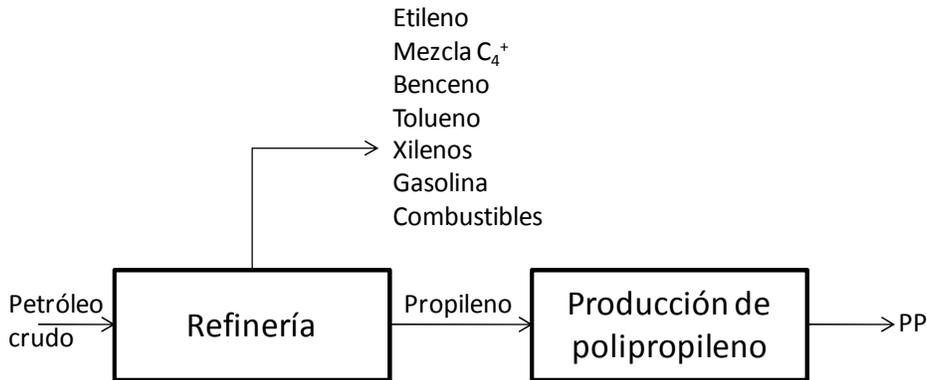


Figura A2.3. Cadena de producción de polipropileno

Mientras que la Figura A2.4 muestra el esquema de refinería base para esta tesis. Este tipo de configuración está orientada hacia el incremento en la producción de propileno y aromáticos. El rendimiento total de petroquímicos es de aproximadamente 50%. Con esta configuración, se pueden lograr ahorros en la inversión y en el costo de operación, si la regulación ambiental no

establece la desulfurización de la carga de alimentación a la unidad de desintegración catalítica (Escobar-Toledo, 2006).

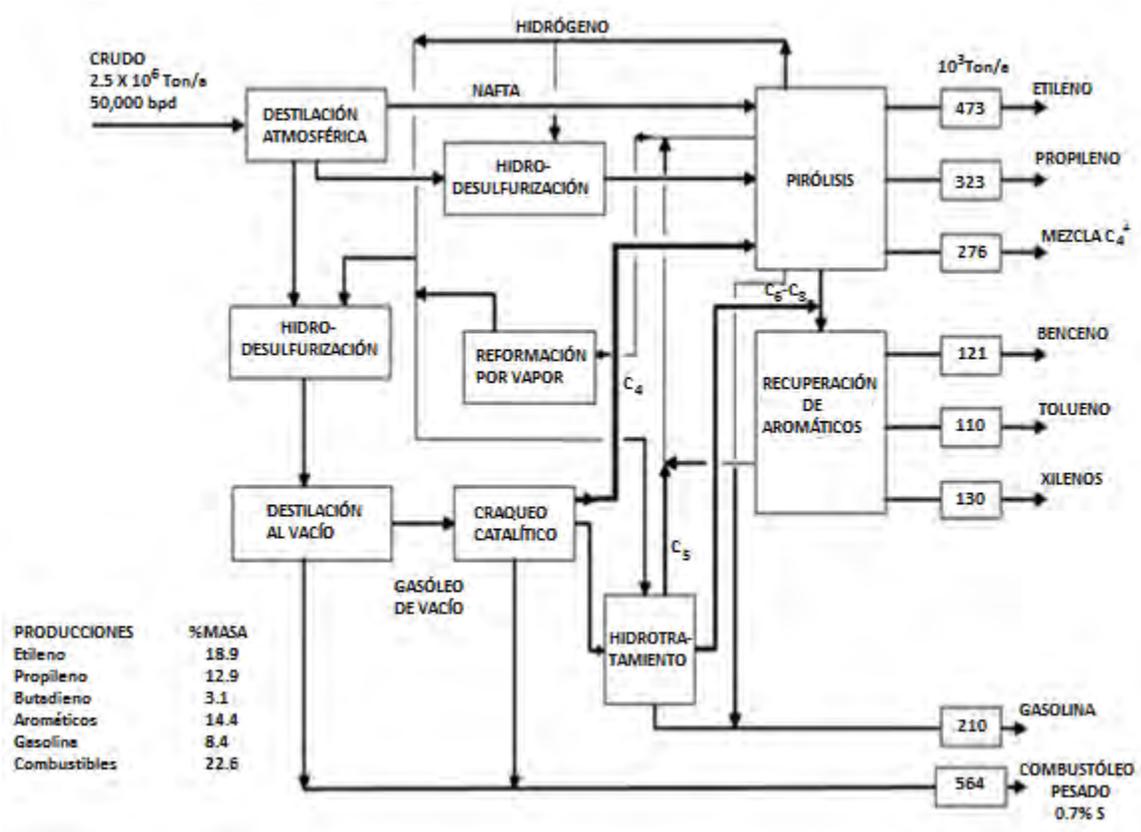


Figura A2.4. Configuración de la refinería base. Fuente: Escobar-Toledo, 2006

- **Balance de materia para una tonelada de PP**

Se calcula la cantidad de barriles de petróleo necesarios para la manufactura de una tonelada de polipropileno, considerando los rendimientos en la refinería que se muestran en la Figura A2.4. Se realiza la equivalencia por medio del coeficiente insumo-producto para el caso de la polimerización.

$$\left(\frac{1.045 \text{ ton propileno}}{\text{ton PP}}\right) \left(\frac{1 \text{ ton crudo}}{0.129 \text{ ton propileno}}\right) = 8.1 \frac{\text{ton crudo}}{\text{ton PP}}$$

$$\left(8.1 \frac{\text{ton crudo}}{\text{ton PP}}\right) \left(\frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \text{ crudo}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{870 \text{ kg}} \text{ crudo}\right) = 9.31 \frac{\text{m}^3 \text{ crudo}}{\text{ton PP}}$$

$$\left(9.31 \frac{m^3 \text{ crudo}}{\text{ton PP}}\right) \left(\frac{6.2898 \text{ barriles}}{1 m^3} \text{ crudo}\right) = 58.56 \frac{\text{barriles crudo}}{\text{ton PP}}$$

Entonces para la unidad funcional, que corresponde a 1 bolsa “reusable” de polipropileno (0.060 kg) se necesitan:

$$\begin{aligned} \left(8.1 \frac{\text{ton crudo}}{\text{ton PP}}\right) \left(\frac{0.06 \text{ kg}}{\text{u.f.}}\right) \left(\frac{1 \text{ ton PP}}{1000 \text{ kg PP}}\right) &= 4.86 \times 10^{-4} \frac{\text{ton crudo}}{\text{u.f.}} \\ &= 3.51 \times 10^{-3} \frac{\text{barriles crudo}}{\text{u.f.}} \end{aligned}$$

- **Balance de energía para una tonelada de PP**

Para producir una tonelada de PP a partir de propileno grado polímero, se tiene un consumo de electricidad de 507 kWh:

$$\left(\frac{507 \text{ kWh}}{\text{ton PP}}\right) \left(\frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}}\right) \left(\frac{1 \text{ MJ}}{1000 \text{ kJ}}\right) = 1825.2 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PP}}$$

Ahora bien, para estimar la energía requerida en la refinería para producir 1 tonelada de polipropileno, se utiliza la energía consumida en la refinería “Francisco I. Madero” de Petróleos Mexicanos, ubicada en el municipio de Cd. Madero, Tamaulipas, México, que en el 2009 fue de 10,060,993 Gcal/año y se procesaron en esa refinería, en ese año, un total de 151.8 miles de barriles diarios.

$$\left(\frac{10\,060\,993 \text{ Gcal}}{\text{año}}\right) \left(\frac{4.185 \text{ GJ}}{1 \text{ Gcal}}\right) = 42\,105\,255.71 \frac{\text{GJ}}{\text{año}}$$

$$\left(\frac{151\,800 \text{ barriles}}{\text{día}}\right) \left(\frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}}\right) = 55.407 \frac{\text{millones de barriles}}{\text{año}}$$

Por lo tanto, el consumo de energía por cada barril de crudo procesado es de:

$$\left(42\,105\,255.71 \frac{\text{GJ}}{\text{año}}\right) \bigg/ \left(55.407 \frac{\text{millones de barriles}}{\text{año}}\right) = 759.93 \frac{\text{MJ}}{\text{barril}}$$

Y como, para una tonelada de PP, se requieren procesar 58.56 barriles:

$$\left(58.56 \frac{\text{barriles crudo}}{\text{ton PP}}\right) \left(759.93 \frac{\text{MJ}}{\text{barril}}\right) = 44\,501.3 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PP}}$$

El consumo de energía de la cadena completa de producción de una tonelada de polipropileno resulta:

$$1\,825.2 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PP}} + 44\,501.3 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PP}} = 46\,353.5 \frac{\text{MJ TOTALES}}{\text{ton PP}}$$

La cantidad requerida de energía para la unidad funcional de 0.060 kg de PP es:

$$\left(46\,353.5 \frac{\text{MJ TOTALES}}{\text{ton PP}}\right) \left(\frac{0.06 \text{ kg}}{\text{u. f.}}\right) \left(\frac{1 \text{ ton PP}}{1000 \text{ kg PP}}\right) = 2.78121 \frac{\text{MJ}}{\text{u. f. (PP)}}$$

- **Emisiones resultantes de la fabricación de una tonelada de PP**

La cantidad de emisiones de CO₂, en la fabricación de PP corresponde a: 1.67 kg/kg PP. Este dato comprende únicamente el proceso de polimerización. Fuente: SimaPro (2010).

En cuanto a la refinería, se tomaron como base las emisiones de CO₂ generadas en la refinería de Cd. Madero, por ser la que posee la configuración más cercana a la considerada en el análisis, que en el año 2009 fueron de (PEMEX, 2009a,b):

$$2\,357\,645 \text{ ton } CO_2$$

Ahora, si se relaciona con la cantidad de barriles procesados en ese año en esa refinería:

$$2\,357\,645 \text{ ton } CO_2 / 55.407 \text{ millones de barriles} = 0.04255 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{barril procesado}}$$

Entonces se relaciona con la cantidad de barriles necesarios para una tonelada de polipropileno:

$$\left(0.04255 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{barriles crudo}}\right) \left(58.56 \frac{\text{barriles crudo}}{\text{ton PP}}\right) = 2.4918 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton PP}}$$

Las emisiones totales del ciclo de vida para la producción de una tonelada de PP:

$$1.67 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton PP}} + 2.4918 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton PP}} = 4.1620 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton PP}}$$

A2.4 Balances y cálculos para el polietileno de baja densidad (PEBD), obteniendo el etileno a partir de una refinería (PEMEX 2009a,b; PEP, 1998; SimaPro 2010)

Partiendo ahora del crudo, para por medio de una refinería obtener el etileno y posteriormente polimerizarlo, se realizan los cálculos para esta ruta de producción. Tomando en cuenta el rendimiento de etileno en la refinería con una configuración como la presentada anteriormente.

- **Balance de materia para una tonelada de PEBD, obteniendo el etileno a partir de una refinería**

$$\left(\frac{1.06 \text{ ton etileno}}{\text{ton PEBD}}\right) \left(\frac{1 \text{ ton crudo}}{0.189 \text{ ton etileno}}\right) = 5.608 \frac{\text{ton crudo}}{\text{ton PEBD}}$$

$$\left(5.608 \frac{\text{ton crudo}}{\text{ton PEBD}}\right) \left(\frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \text{ crudo}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{870 \text{ kg}} \text{ crudo}\right) = 6.44 \frac{\text{m}^3 \text{ crudo}}{\text{ton PEBD}}$$

$$\left(6.44 \frac{\text{m}^3 \text{ crudo}}{\text{ton PEBD}}\right) \left(\frac{6.2898 \text{ barriles}}{1 \text{ m}^3} \text{ crudo}\right) = 40.55 \frac{\text{barriles crudo}}{\text{ton PEBD}}$$

Entonces para la unidad funcional se necesitan:

$$\begin{aligned} \left(5.608 \frac{\text{ton crudo}}{\text{ton PEBD}}\right) \left(\frac{5.04 \text{ kg}}{\text{u.f.}}\right) \left(\frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} \text{ PEBD}\right) &= 2.83 \times 10^{-2} \frac{\text{ton crudo}}{\text{u.f.}} \\ &= 0.2043 \frac{\text{barriles crudo}}{\text{u.f.}} \end{aligned}$$

- **Balance de energía para una tonelada de PEBD, obteniendo el etileno a partir de una refinería**

El consumo de energía para la polimerización del etileno es el mismo que el obtenido anteriormente y corresponde a:

$$3\,387.6 \frac{\text{MJ}}{\text{ton PEBD}}$$

Ahora bien, la energía requerida en la refinería para producir 1.06 toneladas de PEBD es de:

Como en el caso del polipropileno, se utiliza la energía consumida en la refinería “Francisco I. Madero” de Petróleos Mexicanos, así como la cantidad de barriles de petróleo crudo procesados en el 2009, obteniendo un consumo de energía por cada barril de crudo procesado:

$$759.93 \frac{MJ}{barril}$$

Y como para una tonelada de PEBD se requieren procesar 40.55 barriles:

$$\left(40.55 \frac{barriles\ crudo}{ton\ PEBD}\right) \left(759.93 \frac{MJ}{barril}\right) = 30\ 815.16 \frac{MJ}{ton\ PEBD}$$

El consumo de energía de la cadena completa de producción de una tonelada de PEBD, obteniendo el etileno de una refinería en vez de fabricarlo a partir del gas natural húmedo, es:

$$3\ 387.6 \frac{MJ}{ton\ PEBD} + 30\ 815.16 \frac{MJ}{ton\ PEBD} = 34\ 202.76 \frac{MJ\ TOTALES}{ton\ PEBD}$$

La cantidad requerida de energía para la unidad funcional de 5.04 kg de PEBD es:

$$\left(34\ 202.76 \frac{MJ\ TOTALES}{ton\ PEBD}\right) \left(\frac{5.04\ kg}{u.f.}\right) \left(\frac{1\ ton\ PEBD}{1000\ kg}\right) = 172.38 \frac{MJ}{u.f.(PEBD)}$$

- **Emissiones resultantes de la fabricación de una tonelada de PEBD obteniendo el etileno a partir de una refinería**

De cálculos anteriores se conocen las emisiones de CO₂ generadas en la refinería de Cd. Madero, México, en el año 2009 (PEMEX, 2009a,b):

$$0.04255 \frac{ton\ CO_2}{barril\ procesado}$$

Entonces se relaciona con la cantidad de barriles necesarios para una tonelada de PEBD:

$$\left(0.04255 \frac{ton\ CO_2}{barriles\ crudo}\right) \left(40.55 \frac{barriles\ crudo}{ton\ PEBD}\right) = 1.7254 \frac{ton\ CO_2}{ton\ PEBD}$$

Las emisiones totales del ciclo de vida de producción:

$$2.8062 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton PEBD}} + 1.7254 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton PEBD}} = 4.5315 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{ton PEBD}}$$

A2.5 Balances y cálculos para el polietileno de alta densidad (PEAD), obteniendo el etileno a partir de una refinería

Se procede a realizar los cálculos como en el caso anterior, pero con la información del proceso de obtención de polietileno de alta densidad.

- **Balance de materia para una tonelada de PEAD, obteniendo el etileno a partir de una refinería**

$$\left(\frac{1.025 \text{ ton etileno}}{\text{ton PEAD}} \right) \left(\frac{1 \text{ ton crudo}}{0.189 \text{ ton etileno}} \right) = 5.423 \frac{\text{ton crudo}}{\text{ton PEAD}}$$

$$\left(5.423 \frac{\text{ton crudo}}{\text{ton PEAD}} \right) \left(\frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \text{ crudo} \right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{870 \text{ kg}} \text{ crudo} \right) = 6.23 \frac{\text{m}^3 \text{ crudo}}{\text{ton PEAD}}$$

$$\left(6.23 \frac{\text{m}^3 \text{ crudo}}{\text{ton PEAD}} \right) \left(\frac{6.2898 \text{ barriles}}{1 \text{ m}^3} \text{ crudo} \right) = 39.21 \frac{\text{barriles crudo}}{\text{ton PEAD}}$$

La cantidad de barriles de crudo necesarios para la unidad funcional corresponden a:

$$\begin{aligned} \left(5.423 \frac{\text{ton crudo}}{\text{ton PEAD}} \right) \left(\frac{5.04 \text{ kg}}{\text{u.f.}} \right) \left(\frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} \text{ PEAD} \right) &= 2.73 \times 10^{-2} \frac{\text{ton crudo}}{\text{u.f.}} \\ &= 0.1976 \frac{\text{barriles crudo}}{\text{u.f.}} \end{aligned}$$

- **Balance de energía para una tonelada de PEAD, obteniendo el etileno a partir de una refinería**

El consumo de energía para la obtención de PEAD partiendo del etileno es el mismo que el obtenido anteriormente y corresponde a:

$$1\ 199.384 \frac{MJ}{ton\ PEAD}$$

Ahora bien, la energía requerida en la refinería para producir 1.025 toneladas de PEBD se calcula como en el caso anterior. Como para una tonelada de PEBD se requieren procesar 39.21 barriles:

$$\left(39.21 \frac{barriles\ crudo}{ton\ PEAD}\right) \left(759.93 \frac{MJ}{barril}\right) = 29\ 796.86 \frac{MJ}{ton\ PEAD}$$

En este caso se agrega la energía requerida en el proceso de isomerización del butano para obtener i-butano, dicha energía corresponde a 14.685 MJ/ton PEAD.

El consumo de energía de la cadena completa de producción de una tonelada de PEAD, obteniendo el etileno de una refinería en vez de fabricarlo a partir del gas natural húmedo, es:

$$1\ 199.384 \frac{MJ}{ton\ PEAD} + 29\ 796.86 \frac{MJ}{ton\ PEAD} + 14.685 \frac{MJ}{ton\ PEAD} = 31\ 009.157 \frac{MJ\ TOTALES}{ton\ PEAD}$$

La cantidad requerida de energía para la unidad funcional de 5.04 kg de PEAD es:

$$\left(31\ 009.157 \frac{MJ\ TOTALES}{ton\ PEAD}\right) \left(\frac{5.04\ kg}{u.f.}\right) \left(\frac{1\ ton}{1000\ kg}\right) = 156.28 \frac{MJ}{u.f.(PEAD)}$$

- **Emissiones resultantes de la fabricación de una tonelada de PEAD obteniendo el etileno a partir de una refinería**

Después de obtener las emisiones de CO₂ generadas en la refinería de Cd. Madero, México, en el año 2009 (PEMEX, 2009a,b), se relaciona con la cantidad de barriles necesarios para una tonelada de PEAD:

$$\left(0.04255 \frac{ton\ CO_2}{barriles\ crudo}\right) \left(39.21 \frac{barriles\ crudo}{ton\ PEAD}\right) = 1.6684 \frac{ton\ CO_2}{ton\ PEAD}$$

Para conocer las emisiones totales del ciclo de vida de producción, se adicionan las generadas en la refinería con las del proceso de polimerización:

$$1.567 \frac{ton\ CO_2}{ton\ PEAD} + 1.6684 \frac{ton\ CO_2}{ton\ PEAD} = 3.2353 \frac{ton\ CO_2}{ton\ PEAD}$$

A2.6 Consideraciones para el aditivo oxo-degradante

El aditivo prodegradante fue modelado como el ácido esteárico y una pequeña cantidad de manganeso (Mn), para representar la presencia de estearato de manganeso. La bolsa contiene una cantidad aproximada de 97% de PE, 3% de aditivo. No se encontró una cantidad extensa de datos disponibles sobre la producción del ácido esteárico. La cantidad de energía y el número de emisiones presentes en la manufactura de este producto se muestran en la Tabla A2.1.

Tabla A2.1. Energía y emisiones para el aditivo degradante. *Fuente: SimaPro, 2010*

	Cantidad/ton aditivo	Cantidad/u.f.
Parámetro		
Energía (MJ)	1112.775752	6.008989062
Emisiones CO ₂ (kg)	828.3097345	0.134186177

A2.7 Datos de consumo de recursos y energía para un kilogramo de algodón sin blanquear y un kilogramo de papel tipo Kraft sin blanquear

En el caso del algodón y el papel tipo Kraft, ambos sin blanquear, se muestra una tabla con los datos del inventario del ciclo de vida para cada uno de estos materiales. Dichas tablas sirvieron de base para el cálculo de la exergía del ciclo de vida y fueron tomadas de análisis de ciclo de vida encontrados en la bibliografía. Ver Tablas A2.2 y A2.3.

Tabla A2.2. Consumo de recursos y emisiones para la fabricación de un kilogramo de algodón sin blanquear. *Fuente: Kalliala y Nousiainen, 1999*

	Unidad/kg	Cantidad
Parámetro		
Consumo de energía	MJ	59.8
Recursos no renovables	kg	1.4
Gas natural	kg	0.35
Petróleo crudo	kg	0.53
Carbón	kg	0.52
Gas LP	kg	0.03
Fertilizantes*	kg	0.457
Agua	kg	22,200
Emisiones de CO ₂	kg	4.265

*Los fertilizantes considerados son urea, K₂O₅ y P₂O₅

Tabla A2.3. Consumo de recursos y emisiones para la fabricación de un kilogramo de papel tipo Kraft sin blanquear. Fuente: *SimaPro, 2010*

	Unidad/kg	Cantidad
Parámetro		
Consumo de energía	MJ	45
Recursos no renovables	kg	20.9705
Gas natural	kg	20.7532
Petróleo crudo	kg	0.1153
Carbón	kg	0.102
Agua	kg	6,200
Emisiones de CO ₂	Kg	2.85

A2.8 Balance de exergía

Para calcular las pérdidas de exergía o irreversibilidades de cada cadena de producción, se calcula la exergía correspondiente a cada bloque de proceso. El valor de la exergía de cada sustancia se conoce de *Santoyo-Hernández (2006)*, así como de *Szargut (2005)*. Los valores de exergía química estándar utilizados en esta tesis se muestran en la Tabla A2.4.

En el caso de los polietilenos y el polipropileno; la exergía química se calculó con las fórmulas presentadas en el Capítulo IV. La exergía de la celulosa se utilizó para el caso del papel y del algodón, al poseer un alto contenido de este polímero. Los valores obtenidos para este caso se muestran en la Tabla A2.5.

Siguiendo la metodología descrita en el Capítulo IV, ya que se conocen todas las entradas y salidas. A partir de los balances de materia y energía, se calcula el contenido de exergía de cada entrada y de cada salida para cada proceso. En la Tabla A2.6, se muestran los cálculos para la refinería, cuando se necesita llegar a la fabricación de una tonelada de polipropileno.

De igual forma se hace para cada uno de los procesos. En las Tablas A2.7 y A2.8 se muestra lo obtenido para el centro procesador de gas de Nuevo Pemex, México, partiendo de la cantidad necesaria de gas natural húmedo para la obtención de una tonelada de polietileno de alta densidad.

Tabla A2.4. Valores de exergía química estándar utilizados. Fuente: Santoyo-Hernández (2006) y Szargut (2005)

Especie	Exergía química estándar (Ex_{ch}^0) kJ/kg
Etileno	48,520
Propileno	48,549
Benceno	42,292
Tolueno	43,231
(o-m-p) xileno	43,238
Metano	52,144
Etano	50,031
Propano	49,058
Butano	48,262
Butadieno	43,900
Pentano	48,194
Gasolina	46,650
Diesel	45,650
Turbosina	46,175
Combustóleo	43,800
Crudo Maya	44,210
Crudo Istmo	45,290
Crudo Olmeca	45,615
Carbono	34187
Hidrógeno	118050
Oxígeno	124
Nitrógeno	25
Azufre	18970
K_2O	4385
P_4O_{10}	2907
CH_4ON_2	11483
P_2O_5	2529

Tabla A2.5. Valores calculados de la exergía de los polímeros naturales. Fuente: elaboración propia

Compuesto	Exergía química estándar (Ex_{ch}^0) kJ/kg
PE	46,207
PP	46,207.02
Algodón	19,527.4
Papel	19,527.4

Tabla A2.6. Resultados del balance de exergía para la refinería

Crudo (ton/ton PP)	8.1			
Productos	Rendimiento (% masa)	Producción (ton)	Exergía _{ch} (MJ/Kg)	Exergía productos (MJ)
Etileno	18.9	1.5309	48.52	74279.268
Propileno	12.9	1.0449	48.549	50728.8501
Butadieno	3.1	0.2511	43.9	11023.29
Benceno	5.3	0.4293	42.292	18155.9556
Tolueno	4.3	0.3483	43.231	15057.3573
Xilenos	4.8	0.3888	43.238	16810.9344
Gasolina	8.4	0.6804	46.65	31740.66
Turbosina	4.52	0.36612	46.175	16905.591
Diesel	6.78	0.54918	46.65	25619.247
Combustóleo	11.3	0.9153	43.8	40090.14
			Total exergía producida (MJ)	300411.2934
			Exergía de crudo entrada(MJ)	364810.5
			Irreversibilidad (MJ)	64399.2066

Para el caso de los demás procesos, se tenía más información acerca de los servicios auxiliares. Éstos son incluidos en el balance de exergía. A manera de ejemplo se presenta a continuación la tabla con los resultados del balance de exergía para la polimerización de etileno, vía proceso en suspensión (Phillips Technology). Los datos fueron obtenidos de PEP (1998).

A2.9 Valor del producto

De acuerdo con lo presentado en el Capítulo V, se obtiene el valor del producto para cada opción a partir de los costos de producción y la inversión. En algunos casos, se debió tomar el precio de venta como un equivalente al valor del producto, debido a la falta de disponibilidad de información completa. Tal es el caso del CPG de México, de la producción del algodón, del hilado del algodón, del proceso de fabricación de la bolsa a partir de la resina de polímero y del aditivo prodegradación (estearato de manganeso). Los datos y resultados para cada uno de los materiales estudiados se presentan en la Tabla A2.9.

Tabla A2.7. Resultados del balance de exergía para el centro procesador de gas

		Producción (kg)	Exergía _{ch} (MJ/kg)	Exergía entrada (MJ)
GNH (ft ³)	483954.11	10526.9698	52.144	548918.3133
Productos				Exergía productos (MJ)
Gas natural (ft ³)	755000	7225.329272	52.144	376757.5696
	Producción (bl/MMft ³ GN)			
Etano	38.39	958.3639405	50.031	47947.90631
Propano	31.88	884.7552634	49.058	43404.32371
n-butano	13.08	347.7143041	48.262	16781.38775
i-butano	5.32	149.1219664	48.262	7196.924343
n-pentano	4.28	122.8680836	48.194	5921.504422
i-pentano	3.61	103.6340612	48.194	4994.539944
			Total exergía producida (MJ)	503004.156
			Exergía de GNH entrada(MJ)	548918.3133
			Irreversibilidad (MJ)	45914.15724

Tabla A2.8. Resultados del balance de exergía para la obtención de polietileno de alta densidad a partir de etileno

Entradas	cantidad/ton	cantidad/u.f.	Ex _{ch} (kJ/kg)	Ex _{ch} (kJ/u.f.)
Etileno (ton)	1.025	0.005166	48520.6	250657.4196
Gas natural (Mcal)	44	0.22176	51978.125	928.28736
Agua de enfriamiento (m ³)	63	0.31752	50	15876
Vapor (ton)	0.09	0.0004536	771	349.7256
Electricidad (kWh)	282	1.42128		5116.608
Isobutano (ton)	0.021591	0.000108819	48262	5251.805204
ExTOT entrada				278179.8458
Salidas				
PEAD (ton)	1	0.00504	46207	232883.28
ExTOT salida				236449.8005
IRREVERSIBILIDAD (kJ/u.f.)				38163.52478

Tabla A2.9. Parámetros económicos (US\$/kg)

Proceso	Ganancia	Costo del producto	Valor del producto
CPG*			0.18528
Etileno a partir de etano	0.24015	0.3251	0.56525
PEAD	0.14	0.6575	0.7975
PEBD	0.2615	0.783	1.0445
Refinería	0.05706	0.09555	0.15261
PP	0.18375	0.6707	0.85445
Algodón			0.542840256
Papel tipo Kraft	0.000623758	1.014592134	1.015215893
Hilado del algodón			2.204622622
Fabricación de bolsa			1.961088731
Estearato de Mn			2

El valor del producto para el CPG de México corresponde al precio de transferencia del etileno, fue obtenido de la página electrónica de PEMEX (2010).

El valor del producto de la fabricación de una bolsa, se obtuvo de información proporcionada por el Centro Empresarial del Plástico (CEP, 2010).

Por último, se relaciona el proceso con el coeficiente insumo producto correspondiente, como se ha venido haciendo en los cálculos de los balances de materia y energía.

Finalmente, se presenta la Tabla A2.10 que contiene los resultados de cada opción correspondiente a cada criterio o parámetro.

Tabla A2.10. Resumen de resultados

MATERIAL	Balance materia (bpce/u.f.)	Balance energía (MJ/u.f.)	Irreversibilidad (MJ/u.f.)	Emisiones (g CO ₂ /u.f.)	Valor del producto (US\$/u.f.)
PEBD (GNH)	0.50448321	460.3453848	377.1495706	38.37149682	9.50573296
PEBD (refinería)	0.204355126	172.3819104	281.1935622	22.83884315	19.46158508
PEAD (GNH)	0.487825745	434.680596	348.2653789	31.32593948	8.120804985
PEAD (refinería)	0.197607551	156.2861513	255.477835	16.30615645	18.07441152
PP	0.003513895	2.78121	4.589770556	0.249721121	0.243100784
Algodón	9.306E-07	5.382	292.7337787	0.38385	0.247271659
Papel tipo Kraft	6.38361E-05	1293.975	3486.655285	81.95175	85.58363946
OXO-PEBD (GNH)	0.524302193	478.6106508	426.4568918	43.00878849	10.20317247
OXO-PEBD (refinería)	0.212383363	179.3343256	321.656457	26.86592342	20.55014735
OXO-PEAD (GNH)	0.506990328	451.9376024	394.5067043	35.68644138	8.763836609
OXO-PEAD (refinería)	0.205370705	162.6062331	296.0292838	20.07659545	19.10847768

PEBD (GNH)= polietileno de baja densidad proveniente de gas natural húmedo, PEBD (refinería)= polietileno de baja densidad proveniente de petróleo crudo, PEAD (GNH)= polietileno de alta densidad proveniente de gas natural húmedo, PEAD (refinería)= polietileno de alta densidad proveniente de petróleo crudo, PP= polipropileno, OXO-PEBD (GNH)= polietileno de baja densidad (con agente degradante) proveniente de gas natural húmedo, OXO-PEBD (refinería)= polietileno de baja densidad (con agente degradante) proveniente de petróleo crudo, OXO-PEAD (GNH)= polietileno de alta densidad (con agente degradante) proveniente de gas natural húmedo, OXO-PEAD (refinería)= polietileno de alta densidad (con agente degradante) proveniente de petróleo crudo, bpce= barriles de energético equivalente a petróleo crudo, u.f.= unidad funcional, US\$= dólares de EEUU

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar-Cruz, A.N., Contreras-Durán, J.J. 2008. Beneficios económicos, ambientales y sociales asociados al uso de tecnologías de gasificación en el tratamiento de residuos sólidos urbanos en México. **Tesis de licenciatura**. UNAM, Programa de Ingeniería Química. Facultad de Química. México, D.F. México.

Ahrendts, J. 1977. **The exergy of chemically reacting systems**. VDI Forschungsheft. Düsseldorf, Alemania.

Alcocer-Barrera, F. 2007. Desarrollo sustentable. **Revista del Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República Belisario Domínguez**. 2:22-30.

Anónimo, 1992a. Declaración de Río sobre el medio ambiente y desarrollo, Acuerdos y Tratados, disponible en http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/declaracion_rio_sobre_medio_ambiente_desarrollo.pdf.

Anónimo, 1992b. Sustainable Development and the Environment. Food and Agriculture Organization (FAO). FAO policies and actions, Stockholm 1972- Rio 1992. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/U7260E/U7260E00.htm>.

Anónimo, 2000. Energy technology and climate change: a call to action. OECD/International Energy Agency (IEA). París, Francia.

Anónimo, 2003. Análisis del ciclo de vida (ACV). Fundación Forum Ambiental. Disponible en www.forumambiental.org/cast/archivos/eines12.htm.

Anónimo, 2007. Estrategia de Energía. SENER. México, D.F. México. Disponible en <http://www.sener.gob.mx/res/0/Programa%20Sectorial%20de%20Energia%202007-2012.pdf>.

Anónimo, 2008a. Living Planet Report. WWF. Disponible en http://assets.panda.org/downloads/living_planet_report_2008.pdf.

Anónimo, 2008b. Municipal solid waste generation, recycling and disposal in 1980-2003. Environmental Protection Agency (EPA). Disponible en <http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/municipal/pubs/03data.pdf>.

Anónimo, 2008c. World Energy Outlook. IEA. Disponible en: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/weo2008.pdf>.

Anónimo, 2009a. Food and Agriculture Organization (FAO). Dirección electrónica: http://www.fao.org/index_es.htm.

Anónimo, 2009b. Programa Universitario de Medio Ambiente de la Universidad Nacional Autónoma de México. Dirección electrónica: <http://computo.sid.unam.mx/~puma/html/>.

Anónimo, 2010a. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Dirección electrónica: <http://cuentame.inegi.org.mx/impresion/poblacion/habitantes.asp>.

Anónimo, 2010b. SRI Consulting. Dirección electrónica: <http://www.sriconsulting.com/WP/Public/Reports/polyethylene/>.

Anónimo, 2010c. World Resources Institute (WRI). Carbon Finance at the World Bank: Community Development Carbon Fund. Dirección electrónica: <http://carbonfinance.org/>.

Arredondo, B. 2000. Panorama del algodón en la industria textil mexicana. **Tesis de maestría**. UNAM, Programa de Posgrado en Diseño Industrial. Facultad de Química. México, D.F. México.

Aversano, N., Temperini, T. 2006. El calentamiento global, bonos de carbono: una alternativa. Disponible en http://www.ingenieriaquimica.org/system/files/bonos_carbono.pdf.

Baehr, H. D., Schmidt, E. F. 1963. Definition und Berechnung von Brennstoffexergien. **BWK**. **15(8)**:375-381.

Bana e Costa, C.A., Vansnick, J.C. 1997. Applications of the MACBETH approach in the framework of an additive aggregation model. **Multi-Criteria Decision Analysis**. **6(2)**:107-114.

Bana e Costa, C.A., Vansnick, J.C. 1999. The MACBETH approach: basic ideas, software and an application. En: **Advances in Decision Analysis**. Maskens, N., Roubens, M. Eds. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Países Bajos. Pp. 131-157.

Beccali, G., Cellura, M., Mistretta, M. 2003. New exergy criterion in the "multi-criteria" context: a life cycle assessment of two plaster products. **Energy Conversion and Management**. **44**:2821-2838.

Bosnjankovic, F. 1938. Fight against irreversibilities. **Archiv für Wärmewirtschaft**. **19(1)**:1-2.

Boustead, I. 2005. **Eco-profiles of the European plastics industry: Polypropylene (PP)**. Report for PlasticsEurope. Ed. PWMI. Bruselas, Bélgica.

Brans, J.P., Mareschal, B. 1992. The PROMÉTHÉE – V MCDM problems with segmentation constraints. **INFOR**. **30(2)**:85-96.

Brans, J.P., Mareschal, B. 1994. The Promcalc and Gaia Decision-Support System for multicriteria decision aid. **Decision Support Systems**. **12(4-5)**:297-310.

Brans, J.P., Mareschal, B. 2002. **PROMÉTHÉE-GAIA Une méthodologie d'aide à la decision en presence de critères multiples**. Editions de l'Université Libre de Bruxelles. Bruselas, Bélgica.

- Brans, J.P., Mareschal, B., Vincke, P. 1984. PROMÉTHÉE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis. En ***Operational Research '84***. Brans, J. P. Ed. Pp. 477-490. Amsterdam, Holanda.
- Brundtland, G.H. 1987. ***Our common future. World Commission on Environment and Development (WCED)***. Oxford University Press. Oxford, Inglaterra.
- CEP. 2010. Centro empresarial del plástico. Comunicación personal con Ing. Edith Armillas. México, D.F. México.
- Chaffee, C., Yaros, B.R. 2007. Life cycle assessment for three types of grocery bags - recyclable plastic, compostable, biodegradable plastic and recycled, recyclable paper. ***Progressive Bag Alliance report, (Boustead Consulting & Associates Ltd)***. Disponible en http://www.americanchemistry.com/s_plastics/doc.asp?CID=1106&DID=7212.
- Consoli, F., Allen, D., Boustead, I., de Oude, N., Fava, J., Franklin, R., Jensen, A., Parrish, R., Perriman, R., Postlethwaite, D., Quay, B., Séguin, J., Vigon, B. 1993. ***Guidelines for life cycle assessment: a code of practice***. 1^a ed. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). Bruselas, Bélgica.
- Cornelissen, R. L. 1997. Thermodynamics and sustainable development. The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility. ***Tesis de doctorado***. Universidad de Twente. Twente, Holanda.
- Darrieus, G. 1930. Définition du rendement thermodynamique des turbines a vapeur. ***Rev. Général de l'Electricité***. **27**(25):963-968.
- DeBaufre, W.L. 1925. Analysis of power-plant performance based on the second law thermodynamics. ***Mechanical Engineering***. **47**(5):426-428.
- Dewulf, J., Van Langenhove, H. 2002. Quantitative assessment of solid waste treatment systems in the industrial ecology perspective by exergy analysis. ***Environ. Sci. Technol.*** **36**:1130-1135.
- Dewulf, J., Van Langenhove, H. 2004. Thermodynamic optimization of the life cycle of plastics by exergy analysis. ***Int. J. Energy Res.*** **28**:969-976.
- Dincer, I., Cengel, Y. A. 2001. Energy, entropy and exergy concepts and their roles in Thermal Engineering. ***Entropy***. **3**:116-149.
- Dincer, I., Rosen M. A. 2007. ***Exergy, energy, environment and sustainable development***. Elsevier. Amsterdam, Holanda.
- DOF. 2009. Diario Oficial de la Federación, ***DOF 24-09-2009***. Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el último párrafo del Anexo B y el apartado signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. Poder Ejecutivo Federal, Estados Unidos Mexicanos. México, D.F. México.

- Driver, W.E. 1991. **Química y tecnología de los plásticos**. Compañía Editorial Continental. México, D.F. México.
- Escobar-Toledo, C. E. 1991. Rutas tecnológicas de uso eficiente de energía para la industria petroquímica mexicana. En **Dynamis. Boletín de energía de la UNAM**. Programa Universitario de Energía. Mayo – Agosto. México, D.F. México.
- Escobar-Toledo, C.E. 1995. **Sistema de modelos para la planeación de la industria petroquímica de México**. Academia Mexicana de Ingeniería. México, D.F. México.
- Escobar-Toledo, C.E. 2006. **Restitución del valor agregado y de la productividad de algunas cadenas improductivas de la industria petroquímica en México a través de la reestructuración, simulación y jerarquización tecnológica y de inversiones**. UNAM. México, D.F. México.
- Escobar-Toledo, C. 2009. Notas del curso: “Métodos matemáticos para la toma de decisiones”. UNAM. Facultad de Química. México, D.F. México.
- Escobar-Toledo, C., Esparza, F.E., Puente-Moreno, L., Uquillas, D. 1990. Modelos para la jerarquización y selección óptima de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico. **Ciencia Technol. Ed. (IMIQ)**. 5(1):45-61.
- Escobar-Toledo, C.E., Puente-Moreno, L. 2009. La planeación estratégica y la restitución del valor agregado de la industria petroquímica en México. En **Estudio del estado del arte y prospectiva de la ingeniería en México y el mundo**. Academia de Ingeniería, A.C. México, D.F. México.
- Finnveden, G., Östlund, P. 1997. Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications. **Energy**. 22:923-931.
- Fratzscher, W. 2002. Fran Bosnjakovic and the school of Engineering Thermodynamics in Dresden. En **Proceedings of the International Conference ECOS'2002**. Pp. 1-6. Berlín, Alemania.
- Frías, A.C., García, A.G., Lema, I.I. 2003. Situación de los envases plásticos en México. **Gaceta ecológica**. 69: 67-82. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F. México.
- Fullana, P., Puig, R. 1998. **Análisis de ciclo de vida**. Ed. Rubes. Madrid, España.
- Gaggioli, R. A., Petit, P. J. 1977. Use the second law first. **Chemtech**. 7(8):496-506.
- Gallardo, U. 2005. Mercado de Bonos de Carbono y sus beneficios potenciales para proyectos en México. Presentación. SENER-CONAE. México, D.F. México. Disponible en http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/2820/1/images/Ubaldo_Inclan.pdf.

- Garbulinski, L., Sales, D., Manzano, R., Garay, L., Fourcade, J., Del Rio, A. 2006. **Industrias y servicios: Polipropileno**. Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ingeniería. Mendoza, República Argentina.
- García-Aranda, C. 2003. Análisis de exergía y desarrollo sustentable: ejercicio de evaluación para una planta de amoniaco. **Tesis de maestría**. UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Facultad de Química. México, D.F. México.
- García-Aranda, C. 2008. Selección multicriterio de tecnologías para el procesamiento de crudo en la producción alternativa de petroquímicos en México. **Tesis de doctorado**. UNAM. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Facultad de Química. México, D.F. México.
- GDF. 2009. **Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 656**. México, D.F. México. Disponible en <http://www.consejeria.df.gob.mx/gaceta/index>.
- Grassman, P. 1959. The exergy and the flow diagram of the technically available power. **Allgemeine Wärmetechn.** 9(4-5):79-86.
- IEA, 2009. World Energy Outlook. Presentation to the Press. Londres, Inglaterra.
- INE, 2006. **Tercera Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático**. México, D.F. México. Disponible en <http://www.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/tercomun.pdf>.
- ISO, 2006. International Standard. **Norma ISO 14040:2006**. Environmental management –Life cycle assessment- principles and framework. ISO. 2ª ed. Suiza.
- James, K., Grant, T. 2003. **LCA of degradable plastic bags**. Centre for design at RMIT University. Melbourne, Australia. Disponible en <http://www.europeanplasticfilms.eu/docs/Jamesandgrant1.pdf>.
- James, M. 1999. **Polymer Data Handbook**. Oxford University Press. Oxford, Inglaterra.
- Jiménez, B. 2005. Fabricación de papel Kraft a partir del reciclaje de residuos sólidos. **Tesis de maestría**. UNAM. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Sistemas). Facultad de Química. México, D.F. México.
- Jouget, E. 1907. The theorem of Mr. Gouy and some of its applications. **Rev. Mech.** 2:213-238.
- Kalliala, E., Nousiainen, P. 1999. Life cycle assessment. Environmental profile of cotton and polyester cotton fabrics. **AUTEX Research Journal.** 1(1):8-20.
- Kapur, J.C. 1999. Role of renewable energy for the 21st century. **Renewable energy.** 16(1-4):1245-1250.
- Keenan, J. H. 1932. A steam chart for second law analysis. **Mech. Eng., ASME.** 54(3):195-204.

- Keenan, J. H. 1948. *Thermodynamics*. 3ª ed., Wiley. Nueva York, EEUU.
- Kirk, R.E., Othmer, D.E. 2004. *Encyclopedia of Chemical Technology*. 5a ed. John Wiley & Sons, Nueva York, EEUU.
- Kotas, T.J. 1995. *The exergy method of thermal plant analysis*. 2ª ed. Krieger Publishing Company. Florida, EEUU.
- LGEEPA. 2010. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación, **DOF 06-04-2010**. México, D.F. México.
- Manning, E., Rizzo, B., Wilken, E. 1990. Conservation strategies, sustainable development and climate change. En *Climate Change, Implications for Water and Ecological Resources- Proceeds of an International Symposium/ Workshop*. G. Wall y M. Sanderson, eds. Occasional Paper No. 11. University of Waterloo. Departamento de Geografía. Ontario, Canadá.
- Martínez, I., Vignote, S. 2006. *Tecnología de la madera y de sus derivados*. 3ª ed. Mundi. Madrid, España.
- Montero-Alpírez, G. 2006. Determinación del potencial de mejoramiento exergoecológico de unidades de refinación de petróleo con efluentes gaseosos. *Tesis de doctorado*. UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas. Facultad de Química. México, D.F. México.
- Nguyen, H. X., Wang, Y., Morimoto, K., Yamamoto, R. 2005. Modified ecological footprint evaluation to include resource depletion. En *Proceedings - Fourth International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Eco Design*. Pp. 785-790. Tokio, Japón.
- Ojeda, T. F.M., Dalmolin, E., Forte M.M.C., Jacques, R.J.S., Bento, F.M., Camargo, F.A.O. 2009. Abiotic and biotic degradation of oxo-biodegradable polyethylenes. *Polym Degrad Stab* **94**:965-970.
- PEMEX 2009a. Anuario Estadístico. Petróleos Mexicanos. México, D.F. México.
- PEMEX 2009b. Informe de Responsabilidad Social. Petróleos Mexicanos. México, D.F. México.
- PEMEX, 2010. Dirección electrónica: http://www.ri.pemex.com/files/dcpe/inf02_pq.pdf.
- PEP. 1998. *PEP YEARBOOK INTERNATIONAL*. Stanford Research Institute, Process Economic Program. Vol. 1. Max Sacks Ed. California, EEUU.
- Rivero, R. 1994. El análisis de exergía. *Revista del IMIQ*. **XXXV (11)**:14-27.
- Rivero, R. 2010. Notas del curso. "Uso eficiente de energía". UNAM. México, D.F. México.

- Rivero, R., Anaya, A. 1997. Exergy analysis of industrial processes: energy – economy – ecology. *Latin American Applied Research*. **27**(14):191-205.
- Rivero, R., Montero-Alpírez, G., Pulido, R. 1990. Terminología para la aplicación del método de exergía. *Revista del IMIQ*. **17**:7-11.
- Rodríguez, L. 1980. Calculation of available-energy quantities. En *Thermodynamics: second law analysis, Symposium at the 176th Meeting of the American Chemical Society*. Pp. 39-59. Washington, D.C., EEUU.
- Roy, B. 1973. *La méthode ELECTRE II, une application au média-planning*. M. Ross, ed. North Holland. Pp. 291-302. Amsterdam, Holanda.
- Roy, B. 1985. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Ed. Económica. París, Francia.
- Roy, B., Bouyssou, D. 1993. *Aide multicritère à la decision. Méthodes et cas*. Ed. Económica. París, Francia.
- Saaty, T.L., Vargas, L.G. 1994. *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytical hierarchy process*. Vol. VI. RWS Publications. Pittsburgh, EEUU.
- SAGARPA. 2010. *Monografía de cultivos: algodón*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Poder Ejecutivo Federal. México, D.F. México.
- Santos-Sánchez, J.M. 2007. Criterios de mejora operacional en proyectos de plantas criogénicas mediante análisis exergéticos. *Tesis de licenciatura*. UNAM, Programa de Ingeniería Química. Facultad de Química. México, D.F. México.
- Santoyo-Hernández, J. 2006. Sustentabilidad del sector petrolero en México aplicando el método de análisis de exergía. *Tesis de maestría*. UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Energía. Facultad de Ingeniería. México, D.F. México.
- Sato, N. 2004. *Chemical energy and exergy. An introduction to Chemical Thermodynamics for engineers*. Elsevier. Amsterdam, Holanda.
- Sciubba, E. 2003. Extended exergy accounting applied to energy recovery from waste: the concept of total recycling. *Energy*. **28**:1315–34.
- Scott, G. 2000. Green polymers. *Polym. Degrad. Stab.* **68**:1–7.
- SEMARNAT, 2010. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Dirección electrónica: http://www.uaz.edu.mx/semarnat/cuanto_tarda.html.
- Shieh, J. H., Fan, L. T. 1982. Estimation of energy (enthalpy) and exergy (availability) contents in structurally complicated materials. *Energy Sources*. **6**(1-2):1-46.

- SimaPro. 2010. Base de datos del programa de cómputo. Version 7.2. PRé Consultants. Amersfoort, Holanda.
- Smith, J.M., Van Ness, H.C., Abbot, M.M. 1991. **Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química**. 4ª ed. 2ª ed. en español. Mc Graw Hill. México, D.F. México.
- Sonneveld, K. 2000. Role of life cycle assessment as a decision tool for packaging. **Packaging Technology and Science**. **13**:55-61.
- Sophos, A. 1981. Multiobjective analysis and planning of the petrochemical industry and the synthesis of distillation sequences with energy integration schemes. **Tesis de doctorado**. Universidad de Minnesota. Minnesota, EEUU.
- Sudhakar, M., Doble, M., Murthy, P.S., Venkatesan, R. 2008. Marine microbe-mediated biodegradation of low- and high-density polyethylenes. **Int. Biodeterior. Biodegradation**. **61**:203–213.
- Szargut, J. 1980. International progress in second law analysis. **Energy**. **5**:709-718.
- Szargut, J. 1987. Analysis of cumulative exergy consumption. **Int. J. Energy Res**. **11**:541-547.
- Szargut, J. 1989. Chemical exergies of the elements. **Applied Energy**. **32**:269-286.
- Szargut, J. 2005. **Exergy method, technical and ecological applications**. WIT PRESS. Southampton, Inglaterra.
- Szargut, J., Morris, D. R., Steward, F. R. 1988. **Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes**. Hemisphere Publishing Co. Nueva York, EEUU.
- Szargut, J., Styrylska, T. 1964. Approximate evaluation of the exergy of fuels. **BWK**. **16**(12):589-596.
- Tamiz, M. 1996. **Multi-objective programming and goal programming, theories and applications**. 1ª ed. SPRINGER. Londres, Inglaterra.
- Udo de Haes, H. A., Reinout, H. 2007. Life-cycle assessment for energy analysis and management. **Applied Energy**. **84**: 817-827.
- Ullmann. 1989. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. 5ª ed. VCH Verlag. Weinheim, Alemania.
- UNEP. 2001. Indicators and environmental impact assessment. En **Convention on biological diversity. Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice**. Montreal, Canadá. Disponible en <http://www.biodiv.org/doc/meetings/sbstta/sbstta-07/official/sbstta-07-12-en.pdf>

Villanueva-Moreno, C., Ferrando-Bravo, G. 2010. Situación actual de la oferta y la demanda de la energía primaria en México. En ***Estudio del estado del arte y prospectiva de la Ingeniería en México y el mundo***. Academia de Ingeniería, A.C. México, D.F. México.

Vincke, P. 1989. ***L'aide multicritère à la décision***. Editions de l'Université Libre de Bruxelles. Bruselas, Bélgica.

Vincke, P. 1992. ***Multicriteria decision-aid***. John Wiley & Sons. Chichester, Inglaterra.

Wall, G., Gong, M. 2001. On exergy and sustainable development – Part 2: indicators and methods. ***Exergy, an International Journal***. 4:217-233.

Wells, G.M. 1991. ***Handbook of Petrochemicals and Processes***. Gower Publishing Co. Londres, Inglaterra.